

隧道复合式路面动力响应影响因素的权重分析

翁 斌^{1,2}, 阙 云², 章灿林², 徐 松², 袁 燕², 傅东阳²

(1. 福州外语外贸学院 智能建造学院, 福建 福州 350202;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 为揭示车辆荷载作用下公路隧道复合式路面结构力学响应, 依托实体工程开展现场试验, 采用有限元软件建立三维有限元模型并进行模型精度验证, 分析车辆荷载、路面结构尺寸以及材料参数对有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面动力响应的影响。结果表明: 隧道复合式路面混凝土面层最不利荷载位置为纵缝边缘中部, 轴载和混凝土面层厚度对混凝土面层板底拉应力、沥青层层底拉应变以及层间剪应力的影响较大, 水平荷载和混凝土面层模量对各项动力响应指标的影响较小; 普通复合式路面沥青面层动力响应隧道路面相差较小, 混凝土面层板底拉应力分别为有仰拱的 5.99 倍、无仰拱的 1.74 倍。研究结果可为隧道复合式路面结构设计方法研究提供参考。

关键词: 隧道复合式路面; 动力响应; 现场试验; 数值模拟; 权重分析

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)01—0032—08

Influencing Factors and Weight Analysis of Dynamic Response of Composite Pavement

WENG Bin^{1,2}, QUE Yun², ZHANG Canlin², XU Song², YUAN Yan², FU Dongyang²

(1. College of Intelligent Construction, Fuzhou University of International Studies and Trade, Fuzhou, Fujian 350202, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to reveal the mechanical response of composite pavement structure of highway tunnel under vehicle load, field tests were carried out to collect dynamic response data based on solid engineering. A three-dimensional finite element model was established by using finite element software and the model accuracy was verified to analyze the influence of vehicle load, pavement structure size and material parameters on the dynamic response of tunnel composite pavement with and without invert. The results show that the most unfavorable load position of concrete surface layer of tunnel composite pavement is in the middle of longitudinal seam edge. The axial load and the thickness of concrete surface layer have great influence on the tensile stress of concrete surface layer, the tensile strain of asphalt layer and the shear stress between layers, while the horizontal load and the modulus of concrete surface layer have little influence on the dynamic response indexes. The dynamic response of asphalt surface of ordinary composite pavement structure is less different from that of tunnel pavement. And the bottom tensile stress of concrete surface slab is 5.99 times that with invert and 1.74 times that without invert. The research results can provide a reference for the design method of tunnel composite pavement structure.

Keywords: tunnel composite pavement; dynamic response; field test; numerical simulation; weights analysis

公路隧道设计新规范中建议公路隧道路面采用

复合式沥青路面取代水泥混凝土路面, 复合式路面

收稿日期: 2022-10-19

修稿日期: 2022-11-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008113)

作者简介: 翁 斌(1997—), 男, 硕士, 研究方向为道路工程。E-mail: wengbin_1997@qq.com

通讯作者: 阙 云(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事道路工程方向的教学与研究。E-mail: queyun_2001@fzu.edu.cn

逐渐成为了公路隧道路面的主要结构形式,但国内关于公路隧道路面结构设计并没有明确的规范要求,一般都直接采用《水泥混凝土路面设计规范》或《公路沥青路面设计规范》等相应技术标准。事实上,隧道内路面环境条件、基层支撑条件以及所承受的交通条件与隧道外存在着明显差别^[1]。隧道作为重要的公路交通基础设施,集中了两地之间的大部分交通量,存在交通集中、交通渠化严重且车辆减速及制动次数高的特点。

目前,国内外研究者对复合式路面结构力学响应的理论计算可分为弹性层状体系法与有限元法。甘先永等^[2]、侯荣国等^[3]、高玲玲^[4]、韩海峰等^[5]采用弹性层状理论计算了 CRC + AC 复合式路面结构沥青层的力学响应。Roesler 等^[6]、李盛等^[7-8]、Yang Bin 等^[9]、郑木莲等^[10]通过有限元法,分别进行了 CRC/PCC/CPC + AC 复合式路面结构的力学响应分析。国内在公路隧道复合式路面结构力学响应的研究也有许多的成果,杨群等^[11]、石春香等^[12]、杨士真^[13]通过三维有限元方法分析了隧道复合式路面结构力学响应,分别提出沥青层表面拉应力、层底拉应力、接缝处层顶剪应力、层底拉应变、层间剪应力等作为沥青层厚度的设计指标。陈剑锋^[14]基于弹性层状体系理论,计算层间最大剪应力,考虑隧道内温度变化对隧道复合式路面沥青层进行分段设计。谢建新^[15]、李瑞^[16]、黄兴等^[17]通过有限元方法分析了车辆荷载及温度作用下路面结构参数、结构层厚度、水平荷载和层间接触状况对隧道复合式路面力学响应的影响。宁兵^[18]基于现场加速加载试验,分析了隧道复合式路面结构的力学响应规律。

由以上可知,国内外学者对复合式路面和隧道

复合式路面进行了大量研究,但对象主要为无仰拱的隧道复合式路面结构,且目前对复合式路面结构实际荷载作用下力学响应数据的采集与分析极少,难以体现实际环境中移动荷载下路面结构层受力情况。鉴于此,本文依托于某隧道复合式路面实体工程,开展现场试验并验证有限元模型,进行有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面结构动力响应因素敏感性分析及其影响权重分析,为隧道复合式路面结构设计方法研究提供借鉴。

1 现场试验研究

1.1 传感器埋设与现场测试

1.1.1 试验隧道路面概况

本文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以有仰拱和无仰拱分为两种类型,图 1 为试验路段路面结构示意图。隧道软弱围岩段隧道结构设置仰拱,高强围岩段隧道路面结构不设仰拱。为研究动载对不同隧道复合式路面结构动力响应的影响,在试验路水泥混凝土面层板浇筑之前,选取两种不同结构的混凝土面层板埋设传感器,待沥青面层铺筑完成后进行现场试验。

1.1.2 传感器布置

为测试车辆移动过程中混凝土面层的实际受力情况,在混凝土面层四个位置的板顶与板底分别 DH1204 埋设应变计(行车方向)与 JM-190 油压动压应力计。图 2 为混凝土面层传感器现场布置照片。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埋设传感器,A、B、C、D 分别为纵缝边缘中部、混凝土板中部、横缝边缘中部、板角,传感器的具体布置情况如图 3 所示。

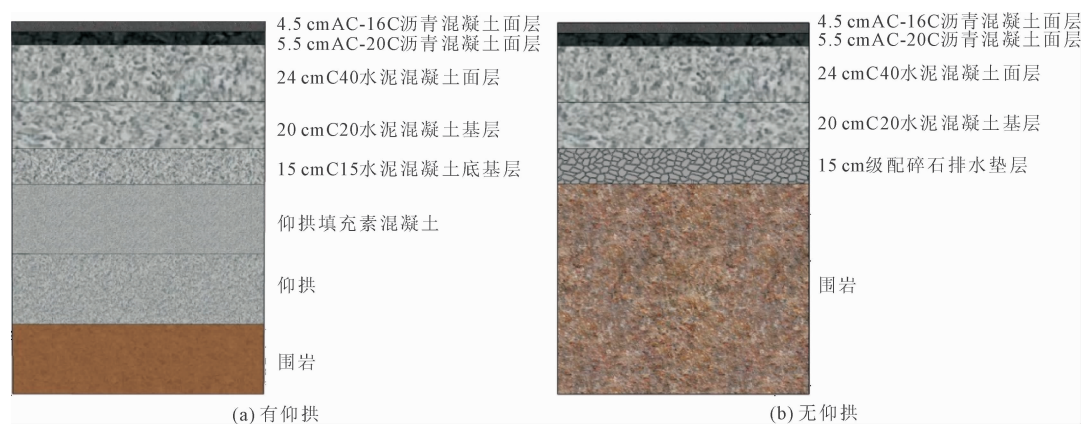


图 1 某隧道复合式路面结构示意图

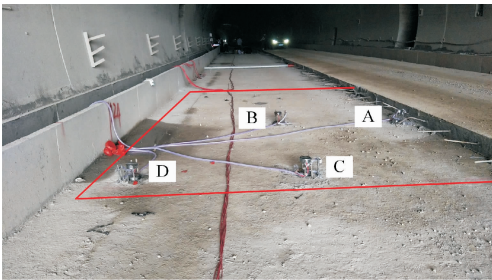


图 2 传感器现场布置照片

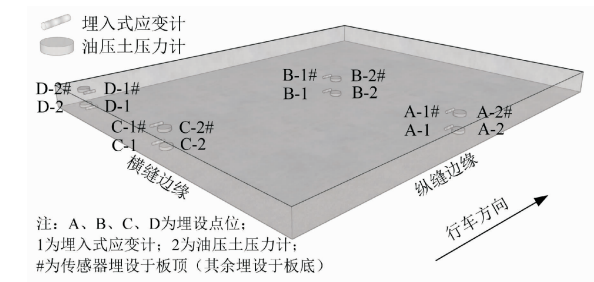


图 3 混凝土面层板传感器布置图

1.1.3 现场测试

沥青面层铺筑完成后,测试不同轴型重型货车在隧道复合式路面上行驶时混凝土面层板的动力响应。表 1 为试验车辆轴载参数与行驶速度,试验中两种重型货车均为超载行驶。试验车辆在预埋传感器的隧道复合式路面行驶,混凝土面板中的传感器得到动力响应,同时用 USB 数据线连接 JM3841 动静态信号测试系统进行数据采集,通过 JMTEST 动态信号测试分析软件进行试验数据的处理分析。

表 1 试验车辆轴载参数与行驶速度

载重情况	荷载Ⅰ车辆		荷载Ⅱ车辆	
	满载	超载	满载	超载
总重力/kN	250.0	350.0	310.0	700.0
载重力/kN	125.8	225.8	161.0	551.0
前轴重力/kN	70.0	98.0	2×65.0	2×146.8
后轴重力/kN	2×90.0	2×126.0	2×90.0	2×203.2
行驶速度/(km·h ⁻¹)	—	20、40、60	—	20、30、35

1.2 试验结果分析

1.2.1 混凝土面层板不同位置处动应变特性

以现场试验中荷载Ⅰ车辆分别在有仰拱(32.64 km/h)和无仰拱(37.37 km/h)的路面上行驶所得 A、B、C 点的混凝土面层板底部纵向动态应变数据为例,如图 4 所示。由图 4 可知,无论是否设置仰拱,混凝土面层板底纵缝边缘中部的动态应变峰值均大于板底中部和横缝边缘中部。有仰拱时,凝

土面层板底中部的动态应变峰值比板底横缝边缘中部大;无仰拱时,混凝土面层板底横缝边缘中部的动态应变峰值比板底中部大。综上,隧道复合式路面结构混凝土面层板在车辆作用下最不利荷载位置为纵缝边缘中部。

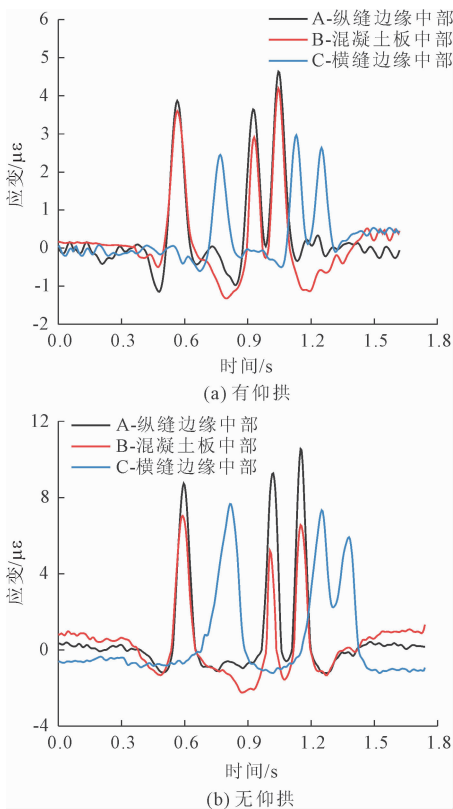


图 4 现场试验中混凝土面层板底纵向动态应变时程曲线

1.2.2 轴载对混凝土面层板动应变的影响

以两种不同超载车辆作用下混凝土面层板底纵缝边缘中部传感器 A-1 所采集的数据为例,如图 5 所示。由图 5 可知,无仰拱的混凝土面层板底动应变大于有仰拱的隧道路面。荷载Ⅰ车辆作用下无仰拱的应变峰值为有仰拱的 2.18 倍,荷载Ⅱ车辆作用下无仰拱的应变峰值为有仰拱的 1.80 倍。有仰拱时,荷载Ⅱ车辆作用下混凝土面层板底的应变峰值是荷载Ⅰ车辆的 1.93 倍;无仰拱时,荷载Ⅱ车辆作用的应变峰值是荷载Ⅰ车辆的 1.60 倍。综上,随着轴载的增加,隧道复合式路面结构混凝土面层板底应变峰值显著增长。

1.2.3 轴载对基层顶面压力动态特性的影响

以两种不同超载车辆作用下,混凝土面层板底纵缝边缘中部传感器 A-2 所采集的数据为例,如图 6 所示。由图 6 可知,车辆荷载作用下,隧道复合式路面结构基层顶面受力主要为压应力。无仰拱的隧

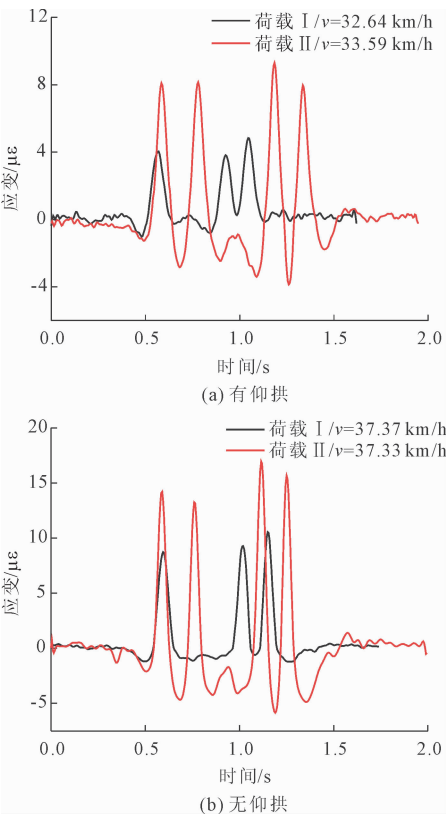


图 5 不同重载车辆作用下混凝土面层板底纵缝中部纵向动应变时程曲线

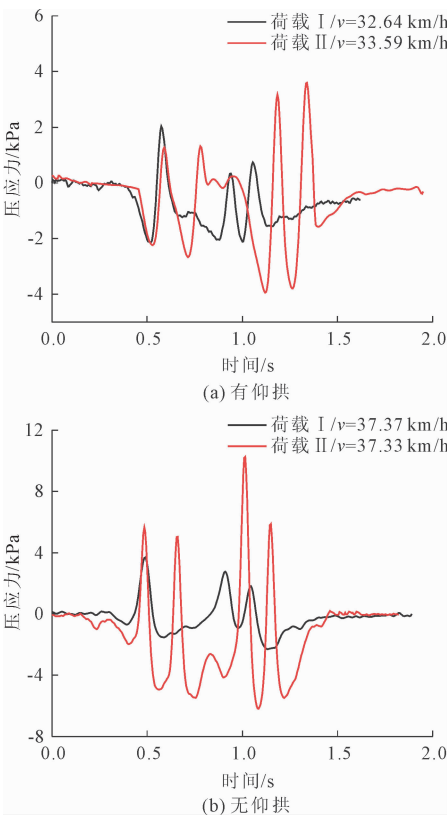


图 6 不同重载车辆作用下混凝土面层板底纵缝中部压力时程曲线

道复合式路面基层顶面压力大于有仰拱的隧道路面。荷载 I 车辆作用下无仰拱的压应力峰值为有仰拱的 1.80 倍,荷载 II 作用下无仰拱的压应力峰值为有仰拱的 2.83 倍。有仰拱时,荷载 II 车辆作用下基层顶面压应力峰值是荷载 I 车辆的 1.78 倍;无仰拱时,荷载 II 车辆作用的应变峰值是荷载 I 车辆的 2.79 倍。

综上,随着轴载的增加,隧道复合式路面结构基层顶面压应力峰值显著增长,无仰拱的隧道复合式路面轴载的敏感性大于有仰拱的路面。

2 有限元模型及精度验证

2.1 有限元模型概况

2.1.1 模型尺寸及材料参数

本文依托隧道路面实体工程建立三维有限元模

型,分别建立图 1 中两种路面结构模型,采用 ABAQUS 有限元软件进行三维建模并划分网格,如图 7 所示。面层与底基层混凝土板沿行车方向长度为 4.5 m,为模拟相邻混凝土板对分析板块的影响,采用两车道共六块路面板模型。横、纵缝尺寸取为 1 cm,横向接缝中间距 30 cm 设置长度 60 cm 的传力杆,纵向接缝中间距 60 cm 设置长度 80 cm 的拉杆。参考设计图与相关规范确定模型中各结构参数,均采用线弹性材料,取值如表 2 所示。

2.1.2 模型尺寸及材料参数

本文采用无限元传输边界模拟远处的围岩介质,减小边界面处因动力荷载在围岩中产成波动而形成的反弹,在 X、Y、Z 方向两侧分别设置无限元边界。

表 2 各结构材料参数

结构	AC-16C 沥青面层	AC-20C 沥青面层	C40 混凝土 面层	C20 混凝土 基层	C15 混凝土 底基层	级配碎石	软弱围岩	高强围岩
厚度 h/cm	4.5	5.5	24.0	20.0	15.0	15.0	—	—
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2450	2430	2500	2450	2400	2000	2200	2600
弹性模量 E/MPa	1300	1200	31000	25000	21000	200	500	8000
泊松比 μ	0.25	0.25	0.15	0.15	0.15	0.20	0.25	0.20

现场试验过程中车辆匀速行驶,故不考虑水平荷载的影响,为简化移动荷载模型,取后双联轴每侧双轮胎进行研究,模型验证中荷载采用表 1 中轴载参数。由现场试验数据分析可知,隧道复合式路面最不利荷位为混凝土面层板纵缝边缘位置,接触形状与荷载作用位置如图 8 所示。

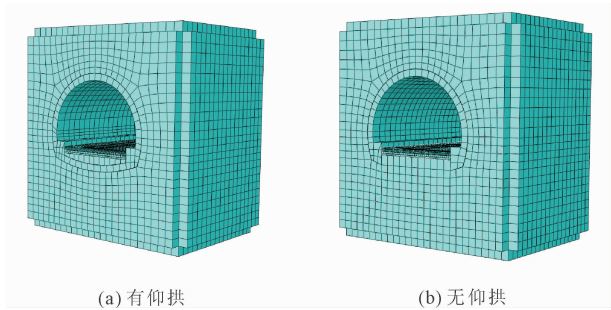


图 7 隧道复合式路面有限元模型网格划分

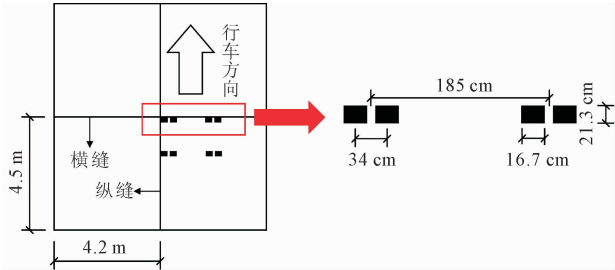


图 8 车辆荷载作用位置与接触形状

2.2 模型验证

图 9 分别为有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应变时程曲线对比。现场试验中所采集的数据增加了车辆前轴通过传感器位置时采集的应变数据。对比可知,有无仰拱的现场试验和有限元模拟得到的混凝土面层板纵缝中部板底动态应变时程的变化规律基本一致。由于现场试验难以保证车辆精确的沿纵缝边缘行驶,故现场试验中测得的板底应变略小于有限元模拟。综上,本文所建立的有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面三维有限元模型,模拟移动荷载作用下路面结构的力学响应具有较好的可靠性。因此,下文采用该模型进行隧道复合式路面结构动力响应因素敏感性分析。

3 结构动力响应因素敏感性分析

分析车辆荷载、路面结构尺寸以及材料参数对有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面动力响应的影响。具体分析工况见表 3,各工况车辆速度均为 80 km/h,车辆荷载轴型采用双联轴每侧双轮。

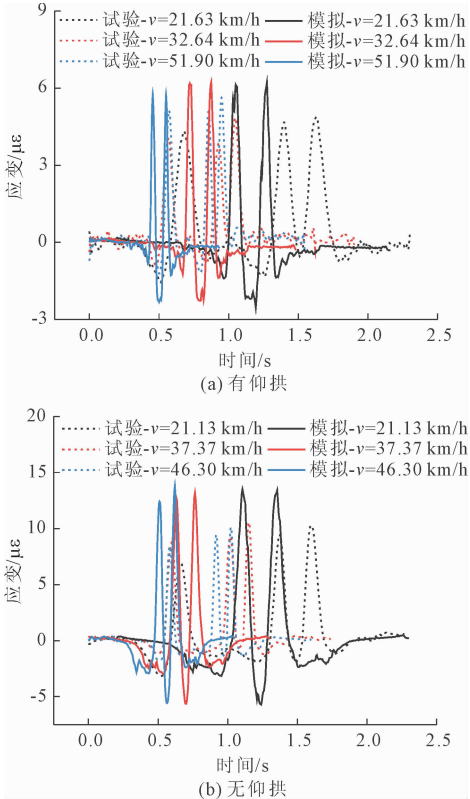


图 9 混凝土面层板纵缝中部板底纵向动应变时程曲线

表 3 敏感性分析工况

影响因素		分析工况	基准工况
荷载参数	轴载 P/kN	150、200、250、300	100
	水平力系数 f	0、0.1、0.5、0.7	0.3
结构尺寸	沥青面层厚度 h_1/cm	8、9、11、12	10
	混凝土面层厚度 h_2/cm	18、20、22、26	24
材料参数	沥青面层模量 E_1/MPa	1000、1400、1600、1800	1200
	混凝土面层模量 E_2/MPa	20000、25000、35000、40000	30000

3.1 分析指标

参考设计规范和相关文献,选取三个分析指标,分别为水泥混凝土面板板底最大拉应力、沥青混凝土面层层底最大拉应变、沥青混凝土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如表 4 所示。

表 4 各指标对应的力学响应及其竖向位置

分析指标	力学响应	平面位置	竖向位置
混凝土面层板底最大拉应力 σ_c	沿行车方向的水平拉应力	纵缝中部处轮迹中部	混凝土面层板底
沥青面层层底最大拉应变 ε_a	沿行车方向的水平拉应变	纵缝中部处轮迹边缘	沥青面层层底
沥青面层层间最大剪应力 $\tau_{\max}$	最大剪应力	纵缝中部处轮迹中部	根据实际情况选取

3.2 车辆荷载参数

3.2.1 轴载

对比分析有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面分别在不同轴载作用下力学响应的变化趋势。图 10 为轴载对 3 项分析指标的影响规律。由图 10 可知, 无论是否设置仰拱, 混凝土面层板底拉应力 σ_c 、沥青面层层间剪应力 $\tau_{\max}$ 、沥青面层层底拉应变 ε_a 均随着轴载的增大而增大。有仰拱时, 当轴载为 300 kN 时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 分别为 100 kN 时的 2.80 倍、2.88 倍、2.76 倍; 无仰拱时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 分别为 100 kN 时的 2.87 倍、2.87 倍、2.88 倍。

综上, 混凝土面层板底拉应力 σ_c 、沥青面层层间剪应力 $\tau_{\max}$ 、沥青面层层底拉应变 ε_a 的增长比例与轴载的增长比例基本一致。

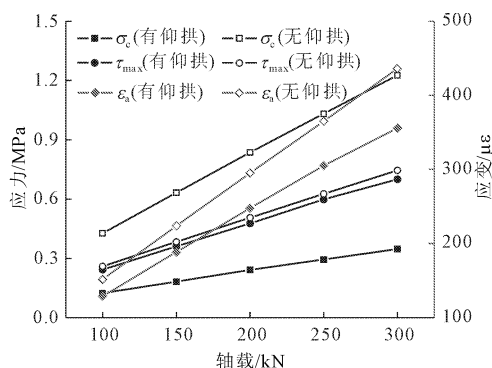


图 10 轴载对分析指标的影响

3.2.2 水平荷载

隧道内车辆加速、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。对比分析有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面在不同水平力系数作用下力学响应的变化趋势。图 11 为水平荷载对 3 项分析指标的影响规律。

由图 11 可知, 无论是否设置仰拱, 混凝土面层板底拉应力 σ_c 、沥青面层层间剪应力 $\tau_{\max}$ 、沥青面层层底拉应变 ε_a 均随着水平荷载的增大而增大。有仰拱时, 当水平力系数从 0 增大到 0.7 时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的升幅分别为 15.38%、15.55%、7.8%; 无仰拱时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的升幅分别为 12.59%、16.67%、5.41%。

综上, 无论是否设置仰拱, 隧道复合式路面的混凝土面层板底拉应力与沥青面层层间剪应力随水平荷载的变化幅度均大于沥青混凝土面层底拉应变。

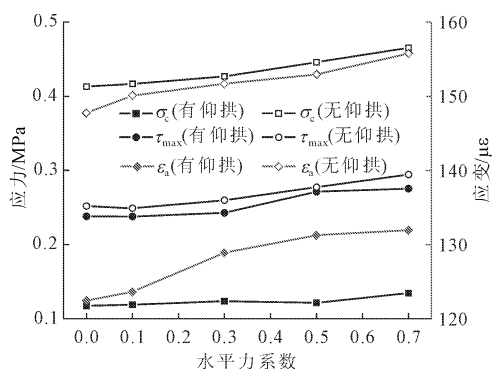


图 11 水平荷载对分析指标的影响

3.3 路面结构尺寸

3.3.1 沥青面层厚度

对比分析有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面不同沥青面层厚度时力学响应在车辆荷载作用下的变化趋势。图 12 为沥青面层厚度对 3 项分析指标的影响规律。

由图 12 可知, 无论是否设置仰拱, 混凝土面层板底拉应力 σ_c 、沥青面层层间剪应力 $\tau_{\max}$ 、沥青面层层底拉应变 ε_a 随着沥青面层厚度的增大而减小。有仰拱时, 当沥青面层厚度从 8 cm 增加到 12 cm 时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的降幅分别为 13.9%、17.8%、32.9%; 无仰拱时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的降幅分别为 14.5%、14.6%、19.4%。

综上, 无论是否设置仰拱, 随着沥青面层厚度的增加隧道复合式路面结构的各项力学响应指标都显著降低, 有仰拱时增加沥青层厚度对沥青混凝土面层底拉应变的影响大于无仰拱。

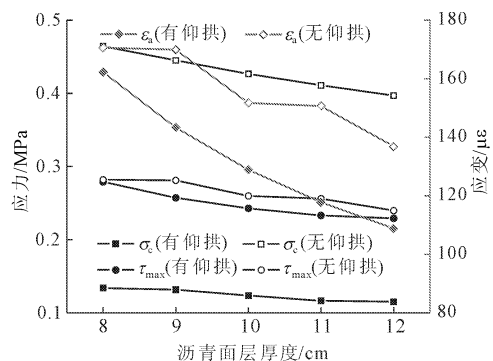


图 12 沥青面层厚度对分析指标的影响

3.3.2 混凝土面层厚度

对比分析有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面不同混凝土面层厚度时力学响应在车辆荷载作用下的变化趋势。图 13 为混凝土面层厚度对 3 项分析指标的影响规律。由图 13 可知, 有仰拱时, 混凝土面

层板底拉应力 σ_c 随着混凝土面层厚度的增大而减小, 沥青面层层间剪应力 $\tau_{\max}$ 、沥青面层层底拉应变 ε_a 随着混凝土面层厚度的增大而增大。当混凝土面层厚度从 18 cm 增加到 26 cm 时, σ_c 的降幅为 24.0%, $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的升幅分别为 2.3%、3.5%。无仰拱时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 随着混凝土面层厚度的增大而减小, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的降幅分别为 40.5%、5.6%、5.34%。

综上, 增大混凝土面层厚度时, 无论是否设置仰拱, 混凝土面层板底拉应力均显著减低; 有仰拱时沥青面层层底拉应变与层间剪应力小幅度上升, 无仰拱时沥青面层层底拉应变与层间剪应力小幅度降低。

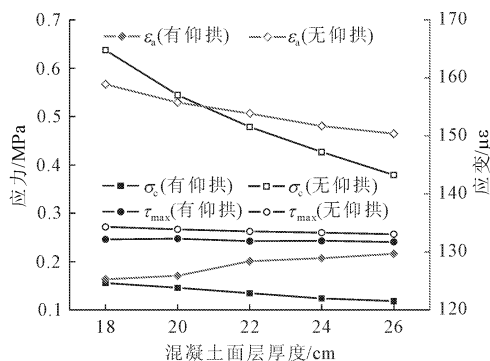


图 13 混凝土面层厚度对分析指标的影响

3.4 路面材料参数

3.4.1 沥青面层模量

对比分析有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面不同沥青面层模量时力学响应在车辆荷载作用下的变化趋势。图 14 为沥青层弹性模量对 3 项分析指标的影响规律。由图 14 可知, 有仰拱时, 混凝土面层板底拉应力 σ_c 、沥青面层层间剪应力 $\tau_{\max}$ 随着沥青面层模量的增大而增大, 沥青面层层底拉应变 ε_a 随着沥青面层模量的增大而减小。当沥青层模量从 1 000 MPa 增大到 1 800 MPa 时, σ_c 、 $\tau_{\max}$ 的升幅分别为 0.8%、7.76%, ε_a 的降幅为 37.75%。无仰拱时, $\tau_{\max}$ 随着沥青面层模量的增大而增大, σ_c 、 ε_a 随着沥青面层模量的增大而减小, σ_c 、 ε_a 的降幅分别为 6.41%、39.16%, $\tau_{\max}$ 的升幅为 8.73%。

综上, 无论是否设置仰拱, 沥青面层层间剪应力均随沥青面层模量的增大而增大, 沥青面层层底拉应变随模量的增大而减小。有仰拱时, 混凝土面层板底拉应力随沥青面层模量的增大变化不显著; 无仰拱时, 混凝土面层板底拉应力随沥青面层模量的增大而减小。

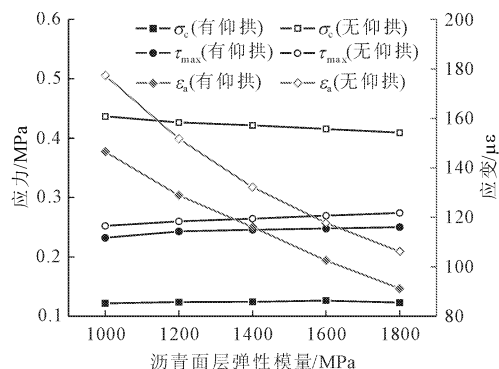


图 14 沥青面层模量对分析指标的影响

3.4.2 混凝土面层模量

对比分析有仰拱和无仰拱的隧道复合式路面不同混凝土面层模量时力学响应在车辆荷载作用下的变化趋势。图 15 为水泥混凝土面层弹性模量对 3 项分析指标的影响规律。由图 15 可知, 无论是否设置仰拱, 混凝土面层板底拉应力 σ_c 随着混凝土面层模量的增大而增大, 沥青面层层间剪应力 $\tau_{\max}$ 与沥青面层层底拉应变 ε_a 随着混凝土面层模量的增大而减小。有仰拱时, 当混凝土面层模量从 20 000 MPa 增大到 40 000 MPa 时, σ_c 的升幅为 33.96%, $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的降幅分别为 0.41%、0.39%。无仰拱时, σ_c 的升幅为 16.11%, $\tau_{\max}$ 、 ε_a 的降幅分别为 3.39%、4.67%。

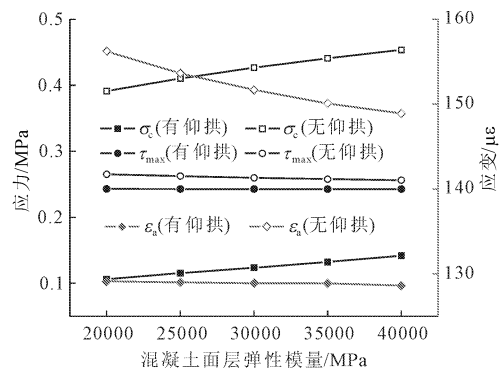


图 15 混凝土面层模量对分析指标的影响

综上, 有仰拱时, 随着混凝土面层模量的增加, 混凝土面层板底拉应力上升幅度显著大于无仰拱的隧道复合式路面。有仰拱时沥青面层层间剪应力与层底拉应变随混凝土面层模量的增加变化不明显, 无仰拱时沥青面层层间剪应力与层底拉应变小幅度减小。

3.5 影响因素权重分析

采用灰色关联分析法分析各影响因素与各项动力响应指标之间的综合关联度及其所占权重值, 如

表 5 所示。由表 5 可知,无论是否设置仰拱,各影响因素与各项动力响应指标之间的综合关联度都大于 0.5,说明各因素对隧道复合式路面结构动力响应的影响显著。有仰拱时,各影响因素与混凝土面层板板底最大拉应力 σ_c 之间的综合关联度及其所占权重排序分别为: $P>h_2>E_1>h_1>f>E_2$;沥青面层层底最大拉应变 ε_a : $h_2>P>E_1>h_1>f>E_2$;沥青面层层间最大剪应力 $\tau_{\max}$: $P>h_2>E_1>h_1>f>E_2$ 。无仰拱时,混凝土面层板板底最大拉应力 σ_c : $P>h_2>E_1>h_1>f>E_2$;沥青面层层底最大拉应变 ε_a : $h_2>P>E_1>h_1>f>E_2$;沥青面层层间最大剪应力 $\tau_{\max}$: $P>h_2>E_1>h_1>f>E_2$ 。

表 5 各影响因素与各项动力响应指标之间的综合关联度(ρ_{0i})及其所占权重值(ω_{0i})

影响因素	轴载 P	水平力系数 f	沥青面层厚度 h_1 /cm	混凝土面层厚度 h_2 /cm	沥青面层模量 E_1 /MPa	混凝土面层模量 E_2 /MPa
有仰拱	ρ_{0i}	0.9826	0.7970	0.8383	0.9432	0.8448
	$\omega_{0i}/\%$	19.26	15.63	16.44	18.49	16.56
	σ_c					
	ρ_{0i}	0.9539	0.8156	0.8691	0.9947	0.8776
	$\omega_{0i}/\%$	18.26	15.62	16.64	19.04	16.80
	ε_a					
有仰拱	ρ_{0i}	0.9929	0.8020	0.8445	0.9524	0.8512
	$\omega_{0i}/\%$	19.33	15.61	16.44	18.54	16.57
	$\tau_{\max}$					
	ρ_{0i}	0.9689	0.7958	0.8343	0.9322	0.8404
	$\omega_{0i}/\%$	19.15	15.73	16.49	18.42	16.61
	σ_c					
无仰拱	ρ_{0i}	0.9655	0.8115	0.8620	0.9906	0.8701
	$\omega_{0i}/\%$	18.54	15.59	16.56	19.03	16.71
	ε_a					
	ρ_{0i}	0.9954	0.8023	0.8452	0.9545	0.8521
	$\omega_{0i}/\%$	19.35	15.60	16.43	18.55	16.56
	$\tau_{\max}$					

3.6 隧道复合式路面与普通复合式路面结构对比

为了解普通复合式路面与隧道复合式路面结构力学响应的差异,在无仰拱的隧道复合式路面模型的基础上,修改模型与参数,土基模量取 80 MPa。取标准轴载 BZZ-100、水平力系数为 0.3,分析不同基层支撑条件下复合式路面 3 项力学响应分析指标的变化规律。

结果表明,各项分析指标时程曲线变化规律基本一致,隧道内复合式路面结构的各项力学响应指标小于隧道外,无仰拱的隧道复合式路面力学响应大于有仰拱。与普通复合式路面结构相比,水泥混凝土面板板底最大拉应力 σ_c 分别为有仰拱的 5.99 倍、无仰拱的 1.74 倍;沥青层层底最大拉应变 ε_a 分别为有仰拱的 1.29 倍、无仰拱的 1.09 倍;沥青层层

间最大剪应力 $\tau_{\max}$ 分别为有仰拱的 1.18 倍、无仰拱的 1.10 倍。

综上,普通复合式路面结构动力响应均大于隧道复合式路面,混凝土面层的动力响应远大于隧道路面,有仰拱时混凝土板板底拉应力显著降低;普通复合式路面沥青面层的动力响应与隧道复合式路面相差较小。

4 结 论

(1) 有/无仰拱的混凝土面层板底纵缝边缘中部的动态应变峰值均大于板底中部和横缝边缘中部,无仰拱的隧道复合式路面混凝土面层板底动应变与基层顶面动土压力大于有仰拱的隧道路面。

(2) 无论是否设置仰拱,各因素对隧道复合式路面混凝土面层板板底拉应力、沥青面层层间剪应力的影响权重排序为:轴载>混凝土面层厚度>沥青面层模量>沥青面层厚度>水平力系数>混凝土面层厚度;对沥青面层层底拉应力为:混凝土面层厚度>轴载>沥青面层模量>沥青面层厚度>水平力系数>混凝土面层厚度。

(3) 与隧道复合式路面相比,普通复合式路面结构动力响应均大于隧道路面,混凝土面层的动力响应远大于隧道路面,沥青面层的动力响应与隧道路面相差较小,混凝土面层板底拉应力分别为有仰拱的 5.99 倍、无仰拱的 1.74 倍。

本研究可为隧道复合式路面结构设计方法研究提供理论参考。

参考文献:

[1] 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.

[2] 甘先永,阳宏毅,赵 健. 面层厚度及粘结层设置对层间剪应力的影响分析[J]. 中外公路,2005(3):49-51.

[3] 侯荣国,赵晓晴,王选仓,等. 长寿命路面结构与寿命预估[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008(2):22-25.

[4] 高玲玲. 连续配筋混凝土复合式沥青路面层间剪应力影响因素分析[J]. 中外公路,2017,37(3):44-47.

[5] 韩海峰,李新伟,李思强,等. 复合式基层沥青路面结构的荷载响应分析[J]. 交通科学与工程,2017,33(1):18-22,99.

[6] Roesler J R, Huntley J G, Amirkhanian A N. Performance of continuously reinforced concrete pavement containing recycled concrete aggregates[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011,2253(1):32-39.

- [J]. 隧道建设,2017,37(9):1146-1152.
- [5] 陶志刚,任树林,王丰年,等.高地应力软岩隧道围岩大变形 NPR 锚索控制方法研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(S2):82-92.
- [6] 王亚锋,高黎.贡山隧道TBM不良地质条件下卡机脱困施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(3):441-448.
- [7] 王玉杰,沈强,曹瑞琅,等.大变形围岩TBM施工适应性分类标准研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2020,2(4):37-43.
- [8] 张伟峰,王海平,赵鑫.调水总干渠引水隧洞复杂地质条件下TBM卡机分析及脱困技术研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6):160-164.
- [9] 田志斌.不同围岩条件对TBM掘进的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(5):159-162.
- [10] 黄兴,刘泉声,刘滨,等.TBM围岩挤压大变形特性分析与等级划分[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(2):260-266.
- [11] 辛凤茂,于茂,解红.富水蚀变岩隧洞TBM掘进支护措施与稳定性研究[J]. 水利规划与设计,2019(11):142-144.
- [12] 于茂,章跃林,隋世军,等.敞开式TBM穿越深埋中强蚀变岩区钢结构承载性能研究[J]. 水利水电工程设计,2019,38(4):1-3,26,56.
- [13] 杜闯东,周路军,朵生君,等.高原铁路隧道TBM适应性选型分析及不良地质对策与思考[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(6):897-912.
- [14] 陈馈,冯欢欢,贺飞.高原铁路TBM隧道建设挑战及装备创新设计探讨[J]. 隧道建设,2021,41(2):165-174.
- [15] 铁路隧道设计规范:TB10003—2016[S].北京:中国铁道出版社,2016.
- [16] Hoek E, Marinos P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000,32(11):45-51.
- [17] 水利水电工程地质勘察规范:GB 50487—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [18] Hasanpour R, Rostami J, Thewes M, et al. Parametric study of the impacts of various geological and machine parameters on thrust force requirements for operating a single shield TBM in squeezing ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,73:252-260.
- [19] Ramoni M, Anagnostou G. Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010,25(4):433-455.
- [20] 吕建乐.TBM扩挖方式及其对比分析[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(6):1058-1064.
- [21] 田彦朝,贺飞,张啸,等.长距离掘进软弱围岩的TBM刀盘扩挖技术[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(5):884-889.
- ~~~~~

(上接第39页)

- [7] Li Sheng, Liu Zhaohui, Li Yuzhi, et al. Study on critical load position and cracking in asphalt layer of continuously reinforced concrete composite asphalt pavement [C]// Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2012,164:26-29.
- [8] 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.
- [9] Yang Bin, Yang Taiqin, Peng Gaodian. Analysis on the loading stress, thermal stress and coupling stress in PCC-AC composite pavement [C]// Advanced Materials Research Trans Tech Publications Ltd, 2012, 383-390; 2700-2704.
- [10] 郑木莲,刘富强,王涛,等.荷载作用下短路基处AC+CPC复合式路面结构应力响应分析[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(4):926-933.
- [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.
- [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.
- [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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 黄兴,胡小弟,李小青.实测轮载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.
- [18] 宁兵.基于足尺试验的隧道路面结构响应研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.