

# 重载作用下脱空对隧道复合式路面竖向位移和最大剪应力的影响

黄 剑

(广东省南粤交通投资建设有限公司, 广州 510199)

**摘要:** 为了研究层间脱空对隧道复合式路面竖向位移和最大剪应力的影响,考虑重载的作用,采用 ABAQUS 建立复合式隧道路面模型,分析脱空区域大小对竖向位移和最大剪应力的影响。结果表明:脱空区域对复合式隧道路面的竖向位移、两车轮中心位移差和最大剪应力的影响显著;随着脱空区域的增大,竖向位移先急剧增大随后增长速率放缓,两车轮荷载中心位移差先增大后减小;当脱空区域面积大于  $0.0225\text{ m}^2$  时,最大剪应力最大值从下面层顶移动至下面层底部脱空区域;随着轴重的增加,脱空区域一侧车轮中心路表位移、两车轮中心路表位移差、最大剪应力最大值均增大。

**关键词:** 复合式路面; 脱空; 有限元; 重载

**中图分类号:** U416.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0314-05

2010 年发布了行业推荐性标准《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)<sup>[1]</sup>,复合式隧道路面逐渐成为隧道路面结构的主流。2018 年第三代设计规范<sup>[2]</sup>中将原 2004 版规范<sup>[3]</sup>中推荐水泥混凝土路面结构改为推荐复合式路面结构,这一改变将复合式隧道路面的应用推向高潮。但是,随着复合式隧道路面的应用发现,该路面结构的力学响应和普通公路沥青路面、普通水凝混凝土路面存在较大差异,因此,许多学者就此展开研究。

丁瑞哲等<sup>[4]</sup>以仁新高速青云山隧道为例,采用 ABAQUS 研究了不同轴载、轮胎作用位置及超载对隧道复合式路面结构力学响应,结果表明,超载显著增大了沥青层间的应力,良好的层间接触有利于降低复合式路面的层间破坏;张明杰<sup>[5]</sup>通过数值模拟分析了隧道复合式路面力学响应;王伟力等<sup>[6]</sup>分析了隧道半刚性基层沥青路面的疲劳开裂,结果表明,基层越厚、沥青层模量越小,对沥青路面的疲劳开裂寿命越有利;程焰兵<sup>[7]</sup>分析了移动荷载下水泥混凝土+沥青混凝土的复合式路面结构的动力响应;杨士真<sup>[8]</sup>采用数值模拟的方式计算了寒区隧道复合式路面结构动力响应并对疲劳寿命进行分析;姬豪杰等<sup>[9]</sup>采用 ANSYS 有限元软件分析了沥青路面厚度和模量对半刚性基层沥青路面力学响

应的影响;秦雨<sup>[10]</sup>分析了耦合荷载下长寿命复合式路面力学响应;邓凤祥等<sup>[11]</sup>通过有限元软件建立了考虑层间接触的复合式路面结构有限模型,分析了层间接触对车辙、纵向拉应力、横向拉应力的影响,结果表明,不同接触状态下,对于纵向拉应力分布影响较大,对于横向拉应力的影响主要靠近表面层;刘溪溪等<sup>[12]</sup>利用 ABAQUS 软件建立了考虑重载和水平荷载的复合式基层沥青路面的三维有限元模型,并对各项力学响应设计指标进行分析,结果表明,车速对路表弯沉影响较大,沥青稳定碎石层拉应力对面层厚度敏感性较高,随着面层厚度的增加路表弯沉、沥青面层剪应力和基层层底拉应力峰值减少,沥青稳定碎石层拉应力峰值逐渐增大;谭晶晶等<sup>[13]</sup>利用有限元软件建立各类路面抗裂结构模型并进行大量理论计算与深入分析,结果表明,基层开裂工况下,复合式柔性基层路面结构沥青层抗拉伸性能受荷载作用位置影响较小,超载情况下,半刚性基层结构路面更容易产生剪切破坏。

大多数学者在对隧道复合式路面进行研究时将沥青层和混凝土层之间的黏结状态看成一个整体,默认为完全连续或完全脱空。实际上,多雨、潮湿地区,山体一般含有丰富的地下水源,在隧道施

收稿日期: 2024-05-20

作者简介: 黄剑(1983—),男,广东河源人,路桥工程师,研究方向为高速公路的试验检测和建设管理。

工时,地下水和空气中的水分使得隧道基层潮湿。通常在施工封层时,会采用空压机、吹雪车、森林灭火器等对基层进行干燥处理,这种方式对单洞长度小于 1 km 的隧道有较好的效果,但是对于单洞长度大于 3 km 且地下水丰富的隧道,干燥效果微乎其微,在基层未完全干燥的状态下施工同步碎石封层会导致封层出现局部起皮剥落的现象(图 1),这将势必会导致沥青层和水泥混凝土层之间呈局部脱空状态,这种剥落区域大小不一致使脱空区域大小不同,对路面结构的力学响应也不同。因此,本文以脱空区域面积为变量,考虑到路面的破坏主要是由竖向变形和剪切变形所致,建立了隧道复合式路面的有限元模型,分析不同脱空区域对竖向变形和剪应力的影响,以期为隧道复合式路面结构设计和层间处理提供参考。



图 1 封层剥落

## 1 计算模型及参数

### 1.1 计算模型

根据广东省怀阳高速公路隧道路面结构设计图纸建立复合式路面三维有限元模型,行车方向(X向)长度为 6 m,道路横向(Z向)长度为 3 m,上、中面层采用 SBS(苯乙烯)改性沥青混合料,规格分别为 AC-16 和 AC-20,下封层为同步碎石封层采用 PG76-10 改性热沥青+洒布碎石,面板为 C40 水泥混凝土,基层为 C20 水泥混凝土。具体路面结构及参数见表 1。

表 1 路面结构参数

名称	厚度/cm	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	
上面层	AC-16	4.5	2 500	1 200	0.35
下面层	AC-20	5.5	2 400	1 000	0.35
下封层	改性热沥青+碎石	—	—	—	—
面板	C40	24.0	2 300	3 000	0.15
基层	C20	15.0	2 300	2 000	0.15

### 1.2 基本假设

(1)采用弹性层状理论体系,各层均为质地均匀、各向同性的完全连续弹性体。

(2)除脱空区域外,其他各位置层间均紧密黏结。

(3)脱空区域内法向接触面之间能够传递的接触压力的大小不受限制,当接触压力变为负值或 0 时,两个接触面发生分离,并且相应结点上的约束会失效;脱空区域切向接触面在整个分析过程中都处于滑动状态。

### 1.3 分析工况

脱空主要是由于碎石封层的施工质量差所致,因此,脱空区域设在下面层和面板之间,为简化计算模型,提高模拟精度,将不规则的脱空区域等效成正方形。为了分析不同脱空区域大小对复合式路面的影响,取脱空区域边长为 0、10、15、20、30、40、50、60、70、80 cm,其中边长为 0 cm 表示无脱空区域,模型示意图如图 2 所示。

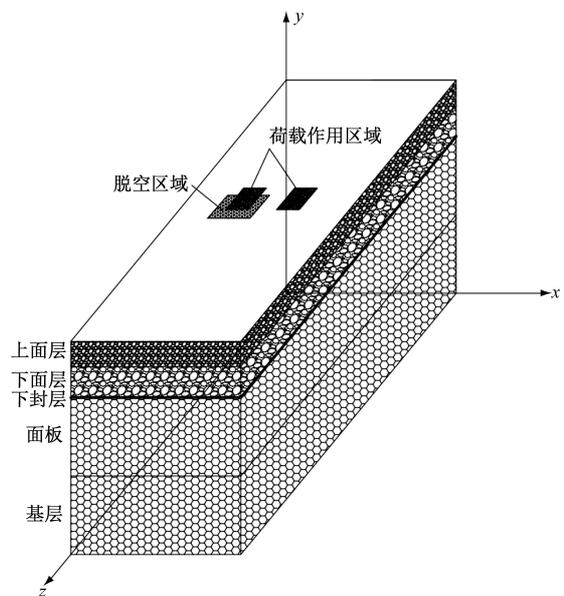


图 2 模型示意图

### 1.4 计算点位的选取

参考《公路沥青路面设计规范》(JTJ D50—2017)<sup>[14]</sup>规定的计算点位要求,结合脱空区域的大小,计算点横向和竖向位置,如图 3 所示,其中  $O_2$  为脱空一侧车轮荷载的中心。

## 2 脱空的影响分析

### 2.1 竖向变形

竖向变形是引起沥青路面拉裂破坏的间接原因。为了分析不同脱空区域大小对竖向变形的影

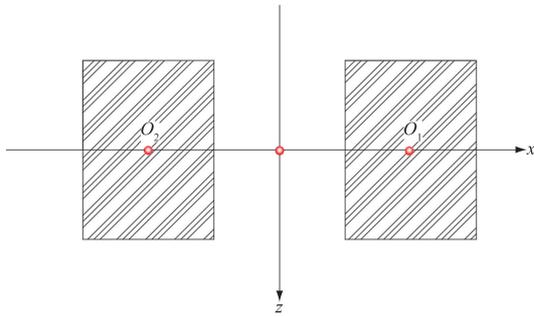


图 3 荷载等效示意图

响,取脱空一侧荷载作用中心位置  $O_2$  的路表的竖向位移为研究对象,将 0.7 MPa 的荷载加载在模型上,计算结果如图 4 所示。

由图 4 可知,随着层间脱空面积的增大,脱空一侧荷载作用中心位置的路表的竖向位移先急剧增大随后增长速率放缓,两车轮心竖向位移差值先增大后减小,说明脱空对竖向变形的影响显著。之所以出现差值先增大后减小是因为随着脱空区域的逐渐增大,另外一车轮逐渐进入脱空区域,该车轮中心的位移也逐渐增大且根据前面的结论可知,刚进入脱空时位移增长率大于完全脱空时,因此造成竖向位移差逐渐减小现象。

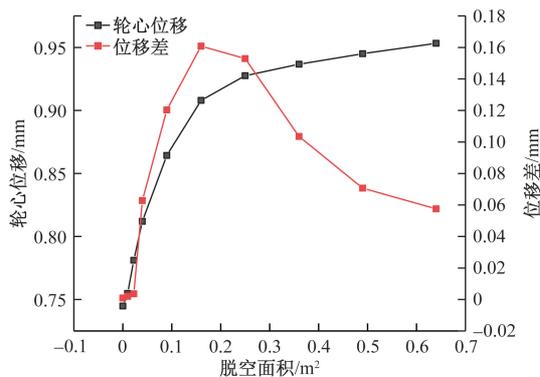


图 4 竖向位移变化图

### 2.2 最大剪应力

沥青路面的拥包和推移等病害与沥青路面在竖向荷载作用下产生的剪应力息息相关,因此本文对复合式隧道路面在竖向荷载作用下产生的最大剪应力进行讨论。在 ABAQUS 中最大剪应力用 tresca 表示,其定义如下。

在 ABAQUS 中最大剪应力的可根据 tresca 应力进行换算。tresca 应力定义如下:

$$\text{tresca} = \sigma_1 - \sigma_3 = 2\tau_{\max} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_1$  为主平面上的第 1 主应力;  $\sigma_3$  为主平面上的第 3 主应力;  $\tau_{\max}$  为最大剪应力。

由式(1)可知,最大剪应  $\tau_{\max} = \frac{1}{2}\text{tresca}$ 。完全黏结、脱空区域大小为 10 cm×10 cm(面积 0.01 m<sup>2</sup>)、脱空区域大小为 15 cm×15 cm(面积 0.022 5 m<sup>2</sup>)和脱空区域大小为 40 cm×40 cm(面积 0.16 m<sup>2</sup>)的 tresca 云图如图 5 所示。

由图 5 可知,当脱空区域小于 0.01 m<sup>2</sup> 时,最大剪应力最大值和完全黏结的相差不大,此时的剪切破坏可能发生在下面层顶部,当脱空区域大于 0.022 5 m<sup>2</sup> 时,最大剪应力最大值位置转移至下面层底部,此时剪切破坏可能在下面层底部脱空区域产生。

为了研究脱空区域大小对下面层底最大剪应力的影响,取下面层底的  $O_2$  位置最大剪应力为研究对象,将 0.7 MPa 的荷载加载在模型上,结果如图 6 所示。

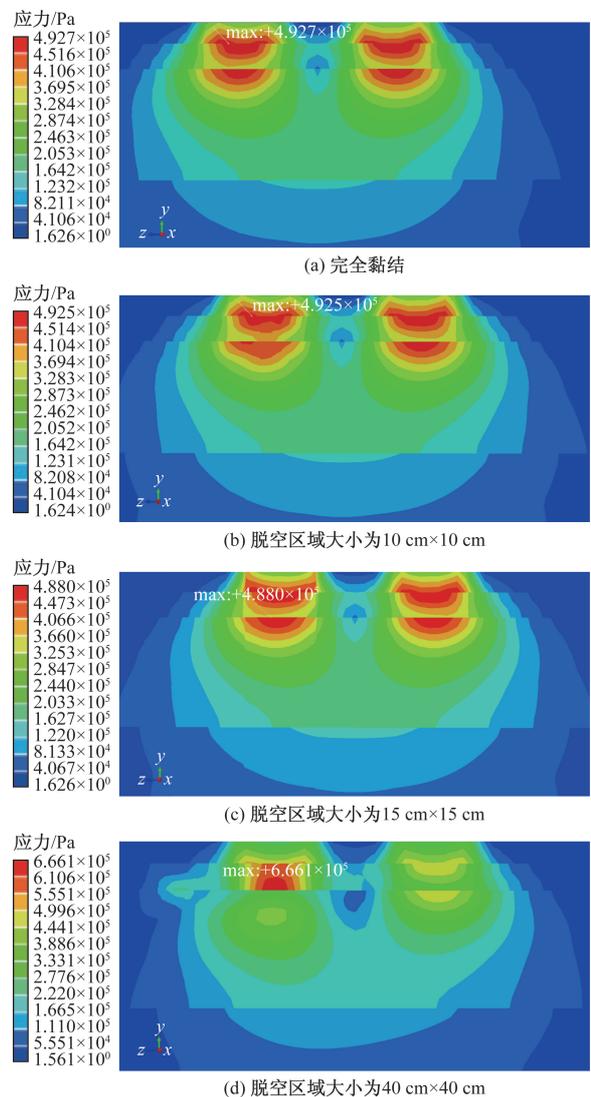


图 5 部分工况剪应力云图

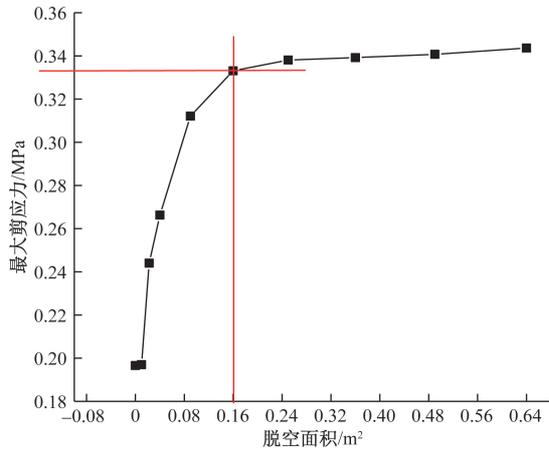


图 6 下面层底最大剪应力变化

由图 6 可知,当脱空区域面积小于  $0.01 \text{ m}^2$  时,下面层底的最大剪应力和完全黏结时相差不大;当脱空区域面积从  $0.01 \text{ m}^2$  增大到  $0.16 \text{ m}^2$  时,最大剪应力急剧增加,增长率达 1.329;当脱空区域大于  $0.16 \text{ m}^2$  后,随着脱空区域的增大,最大剪应力仍然在增大,但是增大幅度较小,此时增长率为 0.019。说明脱空区域的出现使得路面结构的剪应力受力分布情况发生转变,并且剪切破坏程度显著增加。

### 3 重载的影响分析

已有研究表明<sup>[15-16]</sup>,重载是引起沥青路面破坏的主要原因之一,因此在分析时有必要考虑重载的影响。根据第 2 节的分析发现,脱空区域大小为  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  是竖向变形和最大剪应力最大值变化的拐点。鉴于此,本文考虑重载的影响,将 100、150、200、250 kN 分别施加在全黏结和脱空区域为  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  的模型上,对比分析路表  $O_2$  点竖向位移、路表  $O_1$  和  $O_2$  点位移差、下面层底  $O_2$  点最大剪应力,结果见表 2。

为了更直观地观察不同脱空面积和超载率对竖向位移及应力值的影响,采用折线图将变化趋势表示出来,如图 7 所示。

由表 2 和图 7 可知,随着轴载的增加,两种模型

表 2 重载对位移和最大剪应力的影响

黏结状态	参量	荷载/kN			
		100	150	200	250
完全黏结	竖向位移/mm	0.75	0.98	1.18	1.37
	位移差/mm	0.75	0.98	1.17	1.35
	最大剪应力/MPa	0.18	0.23	0.28	0.33
$40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$	竖向位移/mm	0.91	1.20	1.45	1.67
	位移差/mm	0.75	1.07	1.29	1.49
	最大剪应力/MPa	0.33	0.42	0.50	0.58

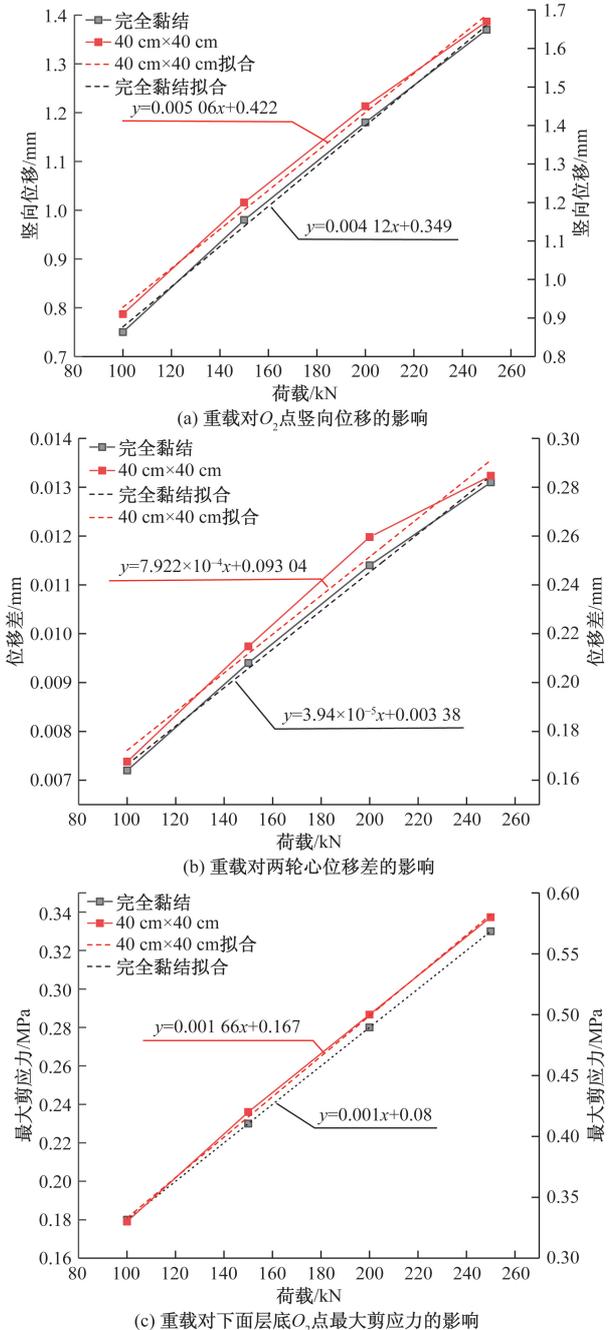


图 7 重载对力学响应的影响

的竖向位移、轮心位置位移差、最大剪应力随之近似呈线性增长的趋势,并且存在脱空区域的各力学响应指标始终大于完全黏结状态下的各力学指标。重载对存在脱空区域的结构的影响大于对完全黏结结构影响。

### 4 结论

(1)随着脱空区域的增大,脱空一侧车轮荷载作用位置路表的竖向位移先急剧增大,当脱空区域大于  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  时,竖向位移增长速率放缓。

(2)当脱空区域小于  $0.0225 \text{ m}^2$  时,最大剪应

力最大值同完全黏结相似,在下面层顶取得最大值,当脱空区域大于 $0.0225\text{ m}^2$ 时,最大剪应力最大值在下面层底面脱空区域取得。

(3)随着轴重的增加,脱空区域一侧车轮中心路表位移、两车轮中心路表位移差、最大剪应力最大值均增大,且重载对存在脱空区域路面结构影响更大。

本文的研究成果证明脱空对隧道复合式路面的影响极为重要,后续应重视封层的施工质量,在潮湿多雨长隧道封层可采用特种耐潮湿材料进行施工以提高层间黏结,提高隧道路面的承载力。

### 参考文献

- [1] 公路隧道设计细则: JTG/T D70—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] 公路隧道设计规范(第一册土建工程) 建筑规范: JTG 3370. 1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [3] 公路隧道设计规范: JTG D70—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [4] 丁瑞哲, 于海利, 邱胜华, 等. 不利状态下的隧道复合式路面结构有限元分析[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(1): 154-158.
- [5] 张明杰. 复合式路面与半刚性路面力学响应的对比[J]. 石油沥青, 2016, 30(6): 16-19.
- [6] 王伟力, 唐中华, 孔令云, 等. 隧道半刚性基层沥青路面沥青层疲劳开裂分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 39-45.
- [7] 程焰兵. 移动荷载下 CRC+AC 复合式路面结构的动力响应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [8] 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.
- [9] 姬豪杰, 谢海巍, 刘尊青. 基于有限元 ANSYS 的半刚性基层沥青路面力学响应分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5092-5097.
- [10] 秦雨. 耦合荷载下长寿命复合式路面力学响应与结构组合分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [11] 邓凤祥, 秦苗, 李盛, 等. 连续配筋混凝土复合式沥青路面层间接触对其力学响应影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(4): 718-723.
- [12] 刘溪溪, 谢海巍, 刘尊青, 等. 重载交通下复合式基层沥青路面动力学响应研究[J]. 公路工程, 2023, 48(4): 78-83.
- [13] 谭晶晶, 申爱琴, 郭寅川, 等. 新疆地区基层开裂工况下沥青路面力学响应[J]. 公路, 2022(10): 98-105.
- [14] 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [15] 包聪灵. 重载作用下半刚性基层沥青路面的力学响应分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [16] 许新权, 吴传海, 李善强. 广东省高速公路典型结构沥青路面使用性能调查与分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016(40): 689-693.

## Influence of Heavy Load and Interlayer Void on the Vertical Displacement and Maximum Shear Stress of Compound Pavement of Extra-long Tunnel

HUANG Jian

(Guangdong Nanyue Transportation Investment & Construction Co., Ltd., Guangzhou 510199, China)

**Abstract:** In order to study the effect of voids on the vertical displacement and maximum shear stress of the tunnel composite pavement, considering the effect of heavy load, ABAQUS was used to establish a composite tunnel pavement model, and the size of the void area on the vertical displacement and maximum shear stress was analyzed. The results show that the void area has a significant effect on the vertical displacement of the composite tunnel pavement, the difference between the center displacements of the two wheels and the maximum shear stress. As the void area increases, the vertical displacement first increases sharply and then the growth rate slows down. The displacement difference between the load centers of the two wheels increases firstly and then decreases. When the area of the void area is greater than  $0.0225\text{ m}^2$ , the maximum shear stress moves from the top of the lower layer to the void area at the bottom of the lower layer. As the axle load increases, the void area becomes one displacement of the center road surface of the side wheel, the displacement difference of the center road surface of the two wheels, and the maximum value of the maximum shear stress increased.

**Keywords:** composite pavement; void; finite element; heavy load