

DOI: 10.16799/j.cnki.csdqfh.241083

# 服务区透水混凝土道面结构力学行为研究

陈展军<sup>1</sup>, 池坤敏<sup>1</sup>, 周大垚<sup>2</sup>, 陈搏<sup>3</sup>

(1. 广东省路桥建设发展有限公司广贺分公司, 广东 肇庆 526400; 2. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 3. 广州肖宁道路工程技术研究事务所有限公司, 广东 广州 510641)

**摘要:** 为提升服务区形象和服务水平, 排水式路面是一种较有效的解决方案。由于当前高速公路服务区道面结构设计缺乏明确的设计标准, 针对服务区不同服务对象, 调研并计算了不同典型荷载面积与压力值, 构建了三维有限元模型, 对不同典型荷载做了多种工况的布置, 最后开展了不同透水混凝土结构组合方案下的结构力学行为研究。结果表明: 对于带施工缝的水泥混凝土板, 荷载作用于板角位置时层底应力最大, 板中位置次之, 板边位置最小; 不同典型荷载下的混凝土层底拉应力差异较大, 重车荷载下的层底应力是行人荷载工况的45~87倍, 是小车荷载工况的9~11倍; 透水混凝土结构面层厚度的增加可以有效减少面层层底应力, 当透水混凝土厚度到达0.13 m之后, 面层层底拉应力的变化趋势明显变缓; 考虑到透水混凝土结构的耐久性和排水效果, 建议采用透水混凝土厚度为0.13 m的设计方案。

**关键词:** 高速公路服务区; 道面结构; 透水混凝土; 典型荷载; 力学行为

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0071-06

## Study on Mechanical Behavior of Permeable Concrete Pavement Structure in Service Area

CHEN Zhanjun<sup>1</sup>, CHI Kunmin<sup>1</sup>, ZHOU Dayao<sup>2</sup>, CHEN Bo<sup>3</sup>

(1. Guanghe Branch, Guangdong Road & Bridge Construction Development Co., Ltd., Zhaoqing 526400, China; 2. Guangdong Transportation Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China; 3. Guangzhou Xiaoning Road Engineering Technology Research Office Co., Ltd., Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In order to improve the image and service level of service areas, the pavement has become a more effective solution. Due to the lack of clear design standards for pavement structure in the expressway service area at present, aiming at the different service objects in the service area, the different typical load areas and pressure values are investigated and calculated. The three-dimensional finite element model is established. A variety of conditions are arranged for different typical loads. Finally, the structural mechanical behavior of different permeable concrete structures is studied. The results show that for the cement concrete slab with construction joint, when the load acts on the corner position of the slab, the bottom stress is the largest, followed by the middle position of the slab, and the edge position of the slab is the smallest. The tensile stress at the bottom of concrete layer under different typical loads is quite different. The stress at the bottom of concrete layer under heavy load is 45~87 times that of pedestrian load and 9~11 times that of trolley load. The increase of surface thickness of permeable concrete structure can effectively reduce the bottom stress of surface layer. After the thickness of permeable concrete layer reaches 0.13 m, the variation trend of tensile stress at the bottom of surface layer becomes slower obviously. Considering the durability and drainage effect of permeable concrete structure, it is recommended to adopt the design scheme of 0.13 m-thick permeable concrete slab.

**Keywords:** expressway service area; pavement structure; permeable concrete; typical load; mechanical behavior

## 0 引言

服务区作为高速公路综合性服务场所, 对加强

高速公路管理、推动区域经济效益、促进高速公路行业可持续发展具有重要意义。但在高速公路运营中发现, 服务区的路面早期损坏严重, 通车2~3 a后, 往往开始出现各种病害<sup>[1]</sup>。主要表现为横向裂缝、破碎板及交叉裂缝、错台, 且在车辆加水区和出入口匝道区损坏最严重, 货车停车区及货车行驶段次之, 加油区两侧路面破损较轻<sup>[2]</sup>。此外, 服务区路面局部

收稿日期: 2024-11-05

作者简介: 陈展军(1988—), 男, 本科, 工程师, 从事高速公路路面施工管理工作。

通信作者: 陈搏(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 从事道路桥梁工程研究工作。

存在较严重的积水,影响场区形象和安全。

现阶段服务区道路主要采用水泥混凝土路面,由于其具有强度高、刚度大等优点,可更好地抵御车辆频繁启停产生的剪切作用<sup>[3]</sup>。但由于水泥混凝土在使用阶段易出现裂缝、破碎、网裂等病害,且行车舒适性较差,路面排水困难。为了改善服务区路面形象和行车舒适性,排水式路面是一个较好的解决途径。排水式路面主要有2类:一类为排水型沥青路面,另一类为无机结合料型排水路面<sup>[4-6]</sup>。许多学者对于排水型沥青路面开展了大量的研究工作。向建方为解决南方多雨地区的路面排水问题,研究了排水式沥青路面的体积设计方法,提高了排水沥青路面的高温性能和排水能力<sup>[7]</sup>。徐良等提出了多序列重复加载试验的方法来模拟排水沥青路面的温度场和轴载作用,进而评价排水沥青路面的高温变形能力<sup>[8]</sup>。王晓威等设计了4种沥青路面结构,按照规范设计方法进行了结构验算,发现排水沥青路面厚度越大,路面结构的抗车辙性能降低,结构承载能力下降<sup>[9]</sup>。排水式沥青路面在公路路面应用取得了较丰富的经验,但是在服务区的道面铺装存在许多问题。由于进出服务区车辆的频繁制动、加速作用,尤其是大型货运车辆的重载作用,对沥青路面产生较大的剪切作用,极易形成车辙、拥包、推移等病害<sup>[10-11]</sup>。此外,货车停车区的柴油泄漏,也造成局部松散、坑槽病害,导致后期的维修养护费用较高,也影响了高速公路的服务功能<sup>[12]</sup>。近年来,一种无机结合料型排水路面技术取得较大的进步,其核心技术在于研发了一种水泥混凝土增强剂,可以提高水泥混凝土强度,在大空隙级配设计下,依然可以保持较高的混凝土抗压和抗折强度水平,其抗油污性能大幅提高,较适合应用于服务区道面。

目前一些省份颁布了高速公路服务区设计指南,对服务区规划与场地等设计要求做了规定,但是对于服务区道面结构设计参数涉及较少,许多项目主要依靠经验来确定或直接采用主线路面结构方案,并未充分考虑服务区特殊的车辆荷载作用方式和服务功能<sup>[13]</sup>。此外,服务区道面关于透水混凝土铺装结构设计关键技术指标有待进一步研究。为此,本研究针对服务区不同服务对象,选取不同典型荷载参数,开展不同透水混凝土结构组合方案下的结构力学行为研究,为服务区道面的透水混凝土结构设计提供技术支撑。

## 1 模型构建

### 1.1 材料参数的确定

选取服务区典型路面结构方案:150 mm厚C35透水混凝土结构+250 mm厚C30普通水泥混凝土结构+150 mm厚水稳级配碎石层+土基,各结构层材料参数如表1所列。在模型建立过程中,结构层视为由各向同性的线弹性材料组成,其力学特性可以通过弹性模量、泊松比、密度和厚度等参数来具体表征。

表1 模型各结构层参数

层位	结构层材料	厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
—	钢筋	—	210 000	0.3	2 500
上面层	C35无机透水混凝土	150	31 500	0.2	2 500
下面层	C30水泥混凝土	250	30 000	0.3	2 500
基层	水稳级配碎石层	150	1 500	0.25	2 500
—	土基	—	60	0.4	2 500

### 1.2 模型的建立

模型中的上部两层混凝土结构层齐缝相切,各路面结构接触为完全连续状态。中上层水泥混凝土板在纵向设置为3块,每块板长5.0 m,宽5.0 m,施工缝宽取4 mm。水稳层无施工缝,与土基完全连续,整体模型宽度取5 m,长度取15.008 m(含施工缝),土基厚度取5 m。在水泥混凝土板之间设置长度为0.4 m、直径为28 mm的传力杆,传力杆最大间距为0.3 m,插入深度取0.13 m。同时考虑到传力杆的传力作用,传力杆由钢筋进行模拟,通过嵌入接触于水泥混凝土中,一端完全固结,另一端只限制竖向自由度,其他方向自由。建立如图1所示的合理的三维模型。

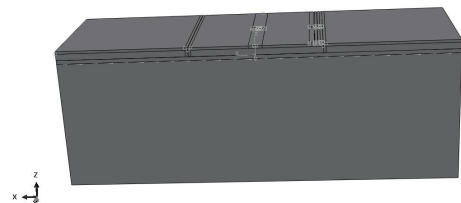


图1 透水混凝土路面模型

### 1.3 网格的划分

本文研究主要为面层结构,并综合考虑荷载逐层扩散后对基层、土基的影响规律,本模型遵循上密下疏的原则进行网格划分,采用的单元为减缩积分的三维线性六面体单元。经过前期的试算,本模型土基采用0.5 m×0.5 m尺寸进行划分,基层采用

0.4 m×0.4 m 的网格进行划分,传力杆采用 0.2 m×0.2 m 的网格处理,单元类型采用 beam 模拟。两层采用 0.3 m×0.3 m 尺寸划分,在接缝位置处进行适当加密。同时,为了方便荷载的施加,在荷载施加区域进行分区设置,并对此区域进行适当加密处理,如图 2 所示。

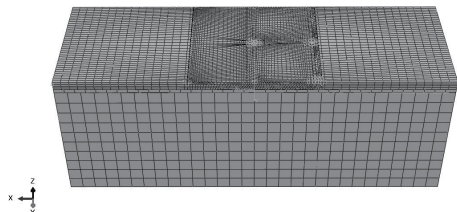


图2 模型网格划分结果

## 2 考虑服务区不同路段的荷载参数确定

考虑到服务区的不同分区服务功能,主要服务对象包括行人、小汽车、货车,因此,本模型围绕主要服务对象,分别选取的典型荷载如下。

(1) 小车荷载:小汽车额定配重一般 2 t(20 kN),单轮负荷一般为 5 kN,接地面积约 10 000 mm<sup>2</sup>,即等于边长 100 mm 的正方形,单轮轮印布置。

(2) 行人荷载:以成年壮汉为例,体重取 100 kg (1 kN),脚印长度约 26 cm,宽度约 10 cm,双脚印布置,步宽取 10 cm。

(3) 重车荷载:按照《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)规定的标准重车压力为 0.7 MPa,单轮荷载为 25 kN,单轮荷载面积为 35 614.6 mm<sup>2</sup>,约等于边长 188.7 mm 的正方形。计算时设置为双轮荷载,轮印中心间距为 319.5 mm。

各类型的荷载分别在板中、板边及板角进行布置,具体布置方式如图 3 和图 4 所示。

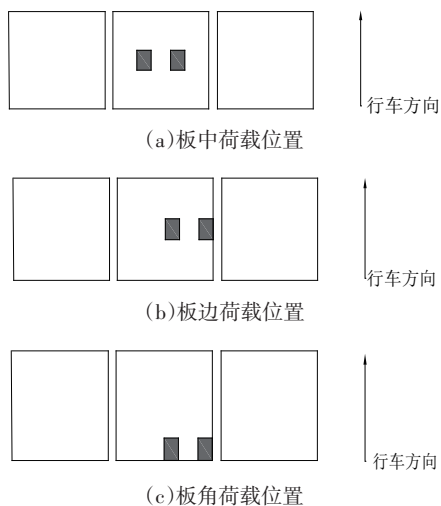


图3 行人及重车荷载作用位置示意图

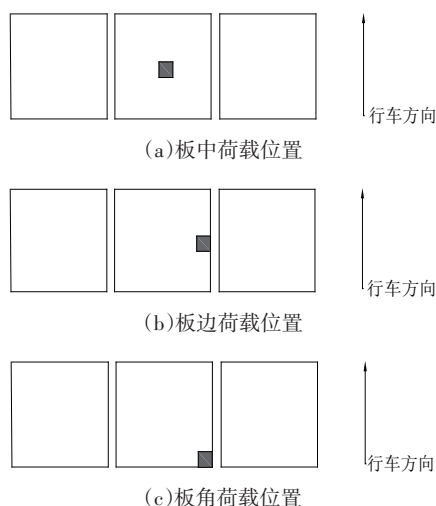


图4 小车荷载作用位置示意图

## 3 铺装结构的力学行为分析

### 3.1 小车荷载下结构响应

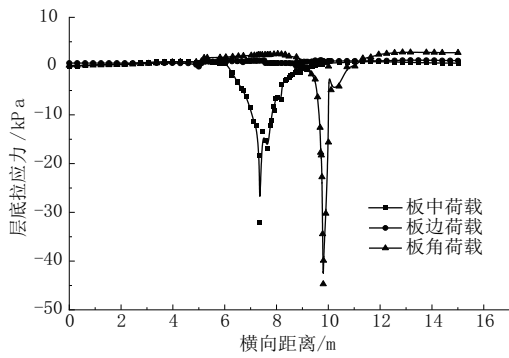
根据上述荷载布置方式进行小车荷载下结构应力响应分析,并按照上面层、下面层、基层底位置路径,提取 C35 透水混凝土结构层层底、C30 水泥混凝土层底及级配水稳层的横向应力,不同荷载位置作用下各结构层力学响应见图 5。

由图 5 可知,各结构层的拉应力在荷载施加处达到最大值,对于面层混凝土,荷载作用于板角位置时层底应力最大,板中位置次之,板边位置最小。在 C35 透水混凝土结构层底的横向应力在板角达到最大,大约为 45 kPa,且此时层底处于受压状态;在 C30 水泥混凝土板底,横向主要处于受拉状态,横向应力在混凝土板角部达到最大,约为 40 kPa;在水稳级配碎石层底,横向应力在板角达到最大,大约为 0.4 kPa,此时为受压状态。综上,小车荷载作用下,该路面结构承受最大的应力为 45 kPa 左右,出现在透水混凝土层,此时为受压状态。

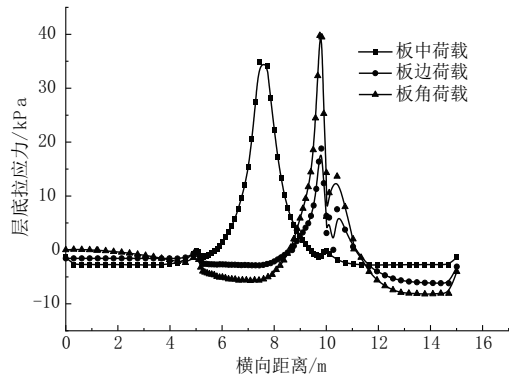
### 3.2 行人荷载不同施加位置下的结构响应

通过在该路面结构施加不同位置处的行人荷载可以得到该结构的应力响应。分别对比不同位置处行人荷载下该路面结构的应力应变规律,具体见图 6。

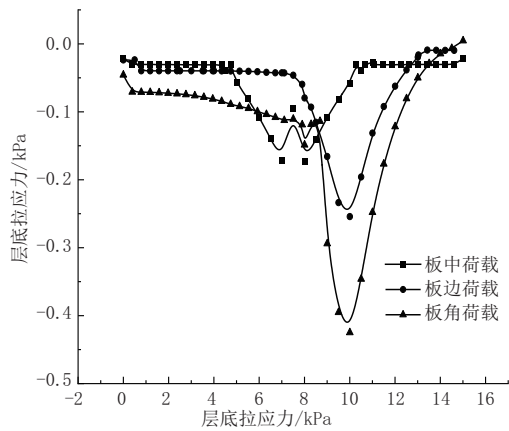
由图 6 可得,在 C35 透水混凝土结构层底的横向应力在板角达到最大,约 4.7 kPa,且此时层底处于受压状态;在 C30 水泥混凝土板底,横向主要处于受拉状态,横向应力在混凝土荷载施加板角部时达到最大,大约为 10 kPa;在水稳级配碎石层底,横向应力在荷载施加板角位置时达到最大,大约为 0.08 kPa,



(a)C35透水混凝土结构层



(b)C30水泥混凝土结构层



(c)水稳级配碎石结构层

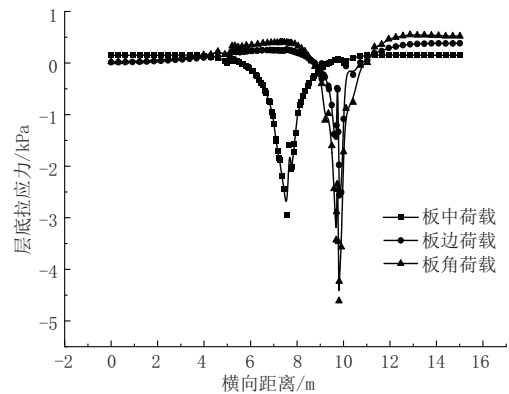
图5 不同位置的小车荷载下各结构层拉应力

此时为受压状态。综上,行人荷载作用下,该路面结构承受最大的应力为10 kPa左右,此时为受拉状态;其中透水混凝土结构层出现最大应力为4.7 kPa左右,此时为受压状态。

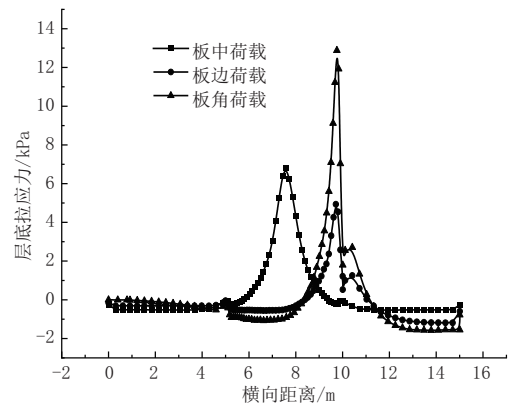
### 3.3 重车荷载不同施加位置下的结构响应

分别对比不同位置处重车荷载下透水混凝土路面结构的应力规律,具体见图7。

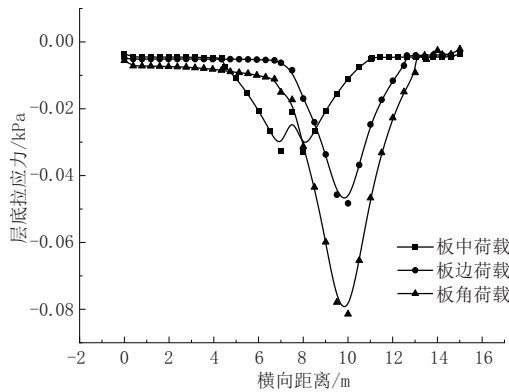
由图7可知,各结构层的拉应力在荷载施加处达到最大值。在C35透水混凝土结构层底的横向应力在板角达到最大,大约为450 kPa,且此时层底处于受压状态;在C30水泥混凝土板底,横向主要处于受拉状态,横向应力在荷载位置处于混凝土板角部时



(a)C35透水混凝土结构层



(b)C30水泥混凝土结构层



(c)水稳级配碎石结构层

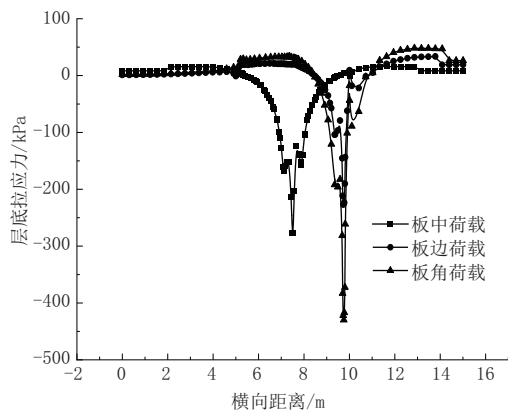
图6 不同位置的行人荷载下各结构层拉应力

达到最大,大约为450 kPa;在水稳级配碎石层底,横向应力在板角达到最大,大约为14 kPa,此时为受拉状态。综上,重车荷载作用下,该路面结构承受最大的应力约为450 kPa,此时为受拉状态;其中透水混凝土结构层约为450 kPa,此时为受压状态。

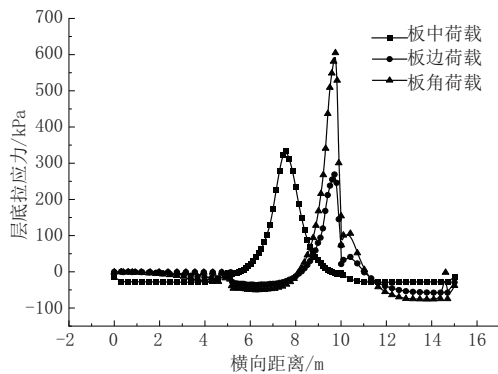
### 3.4 不同荷载在不利位置处层底应力对比

当荷载作用于水泥混凝土板角位置处时为最不利位置,可以得到荷载大小与C35透水混凝土结构层底和C30普通水泥混凝土结构层最大应力的关系,如表2和表3所列。

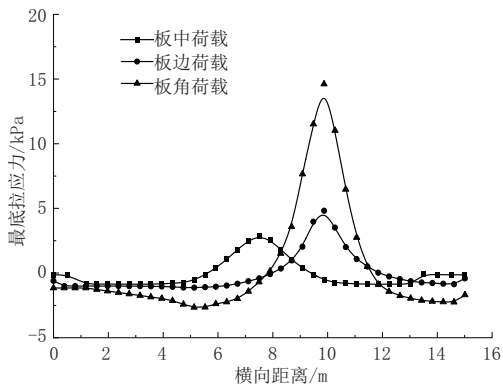
根据调研与相关试验,C35透水混凝土的28 d抗



(a) C35 透水混凝土结构层



(b) C30 水泥混凝土结构层



(c) 水稳级配碎石结构层

图7 不同位置的重车荷载下各结构层横向拉应力

表2 不同荷载与上面层层底最大应力统计 单位:kPa

荷载类型	荷载大小	层底最大拉应力
行人	19.000	-4.897
小车	500.000	-47.704
重车	702.000	-429.797

表3 不同荷载与下面层层底最大应力统计 单位:kPa

荷载类型	荷载大小	层底最大拉应力
行人	19.000	10.000
小车	500.000	40.000
重车	702.000	450.000

压强度 $\geq 35$  MPa, 28 d 抗折强度 $\geq 4$  MPa; 而 C30 混凝土的 28 d 抗压强度 $\geq 30$  MPa, 28 d 抗折强度 $\geq 4.5$  MPa。

由表2与表3分析可得,不同典型荷载下的混凝土层底拉应力差异较大,行人荷载与小车荷载下的层底应力远小于重车荷载,重车荷载下的层底应力是行人荷载工况的45~87倍,是小车荷载工况的9~11倍,因此应重点考虑重车荷载工况作用。上面层透水路面结构层在重车荷载作用下受到最大的拉应力为-0.43 MPa,此时为受压状态,受力位置在板角。而下面层C30水泥混凝土的层底最大拉应力为0.45 MPa。上面层与下面层混凝土的层底应力远小于混凝土抗压强度和抗折强度标准。

### 3.5 不同厚度的透水混凝土结构层力学分析

在透水混凝土路面的设计中,最经济厚度的确定不仅关乎材料成本,还直接影响到道路的整体性能、维护成本及长期效益。通过分析重车荷载下的混凝土面层最大拉应力的相关规律,取100、110、120、130、140 mm的面层厚度在重车荷载位于板角位置处进行分析计算,路径取整个透水混凝土路面板最外侧,得到面层厚度随最大拉应力的关系,有助于确定透水混凝土层的最经济厚度,相应结果如图8所示。

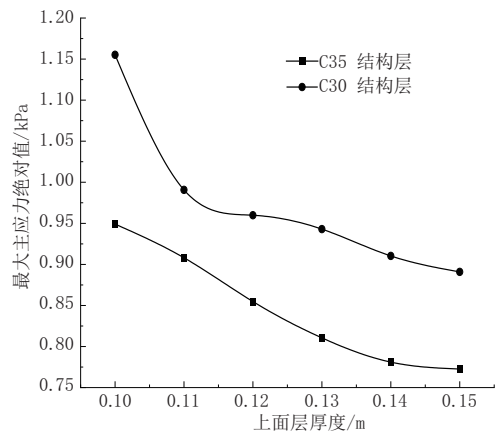


图8 混凝土面层层底拉应力随面层厚度变化

由图8可知,当上面层厚度由0.1 m逐渐增加到0.15 m时,上面层层底最大拉应力绝对值减小了22.86%;下面层层底最大拉应力绝对值减小了29.68%。在透水混凝土层厚度为0.13 m之前,面层层底最大主应力随上面层厚度变化时曲线斜率较大,透水混凝土结构面层厚度的增加可以有效减少面层层底应力。而当透水混凝土层厚度到达0.13 m之后,面层层底拉应力的减小趋势就会明显变缓。结合透水混凝土和C30混凝土指标可知,透水混凝土结构在规范所示的面层厚度条件范围内的最大拉应力都能满足路用要求,但是考虑到透水混凝土结构的耐久性和排水效果,建议采用0.13 m厚度透水

混凝土结构方案。

#### 4 结 语

本文针对服务区不同服务对象,调研并计算了不同典型荷载面积与压力值,构建了三维有限元模型,对不同典型荷载做了多种工况的布置,最后开展了不同透水混凝土结构组合方案下的结构力学行为研究,得出以下结论。

(1)对于带施工缝的水泥混凝土板,荷载作用于板角位置时层底应力最大,板中位置次之,板边位置最小。

(2)不同典型荷载下的混凝土层底拉应力差异较大,重车荷载下的层底应力是行人荷载工况的45~87倍,是小车荷载工况的9~11倍,应重点考虑重车荷载工况作用。

(3)透水混凝土结构面层厚度的增加可以有效减少面层层底应力,当透水混凝土层厚度到达0.13 m之后,面层层底拉应力的变化趋势明显变缓,考虑到透水混凝土结构的耐久性和排水效果,建议采用0.13 m厚度透水混凝土结构设计方案。

#### 参考文献:

- [1] 李自强. 高速公路某服务区水泥路面病害成因及处治研究[J]. 交通世界, 2019(10): 64-65.
- [2] 郑少鹏, 张玲, 张新民, 等. 云南高速公路服务区路面典型病害及处治方案[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(5): 61-63.
- [3] 王佳梅. 高速公路服务区水泥混凝土路面施工技术要点[J]. 交通世界, 2022(26): 85-87.
- [4] 韦奔, 王灿升. 高速公路服务区双层透水沥青路面性能研究[J]. 西部交通科技, 2024(2): 30-32.
- [5] 王鸿森, 张杨, 郑扬. 高速公路服务区透水路面路用性能及应用效果评价[J]. 市政技术, 2023, 41(1): 47-51, 65.
- [6] 李壮. 高速公路海绵服务区建设方案研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [7] 向建方. 基于CAVF法的OGFC路面排水设计与应用[J]. 中国公路, 2024(14): 110-111.
- [8] 徐良, 赵龙, 顾兴宇, 等. 多序列重复加载试验表征排水沥青路面抗永久变形能力[J]. 公路交通科技, 2023, 40(增刊1): 118-126.
- [9] 王晓威, 胡馨予, 陈博. 多层排水沥青路面交通荷载适用性研究[J]. 公路工程, 2023, 48(5): 69-74, 122.
- [10] 钟科, 卢铸, 孙明志, 等. 多轮荷载作用下的高模量沥青道面力学响应特性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5555-5565.
- [11] 王佳妮, 高世杰, 董元帅, 等. 沥青混合料疲劳损伤试验表征综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(7): 2625-2637.
- [12] 谭振宇, 李浩. 柴油泄漏对沥青路面使用性能的影响[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(6): 326-330.
- [13] 韩子程. 高速公路服务区路面改造工程方案研究[J]. 交通世界, 2023(10): 74-76.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadfloodbridge@163.com

