

多孔混凝土基层缩缝处沥青面层荷载应力分析

锁利军¹, 童怀峰¹, 王秉纲², 郑传超²

(1. 洛阳理工学院 土木工程系, 河南 洛阳 471023; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了研究多孔混凝土基层上覆沥青面层的受力状态, 建立了沥青路面三维有限元模型, 引入横观各向同性弹性本构关系模型作为正交各向异性接触模型, 利用有限元软件 ANSYS 计算了多孔混凝土基层缩缝处沥青面层的荷载应力. 计算结果的对比分析表明: 当沥青面层模量不超过 1 600 MPa 时, 多孔混凝土基层缩缝处沥青面层处于受压状态. 荷载作用下, 多孔混凝土基层缩缝处沥青面层内的最大剪应力随面层模量的增加而减小, 随面层厚度的增加而减小, 随基层厚度的增加而减小, 随基层与地基模量比的增加而增加.

关键词: 多孔混凝土基层; 沥青面层; 层间接触模型; 荷载应力; 剪应力

中图分类号: U416. 01

文献标志码: A

0 引言

国内外道路学者对沥青路面的荷载应力进行了广泛的研究. 文献[1]对多孔混凝土基层的力学性能进行了试验研究. 研究表明, 多孔混凝土基层的模量约为 12 000 MPa, 其强度远高于沥青路面中常用的半刚性基层材料. 此外, 多孔混凝土基层还具有排水能力强、抗冲刷性能好和稳定性好的特点. 因此, 多孔混凝土作为沥青路面的基层, 不但可以提高沥青路面基层的强度, 同时可以有效地缓解沥青路面的水损坏. 实践中, 多孔混凝土基层本身存在温缩, 常需设置缩缝. 在车辆荷载的作用下, 基层缩缝处面层易产生应力集中而导致沥青面层底部开裂, 从而引发沥青面层产生反射裂缝. 荷载是沥青路面设计中需要考虑的关键因素, 研究荷载作用下基层缩缝处沥青面层的受力状态是沥青面层厚度设计的重要依据^[2].

胡长顺等前期采用有限元法求解 RCC-AC (碾压混凝土与沥青混凝土) 荷载应力, 在充分考虑各种因素的基础上, 研制出荷载应力计算诺模图^[3]. 杨斌^[4]利用有限元法、断裂力学理论对旧水泥混凝土路面加铺沥青层的荷载应力做了系统分析. 仰建岗等^[5]建立沥青路面的三维有限元模型, 计算贫混凝土沥青路面的荷载应力, 同时对荷载应力的影响因素进行了研究. Von Q. 等^[6]利用

有限元方法对沥青路面的应力状态与反射裂缝发展的关系进行了研究. 但以往的研究工作中未考虑多孔混凝土基层结构及其材料特性, 特别是未涉及多孔混凝土基层缩缝处沥青路面的应力研究^[7-8]. 因此, 有必要对多孔混凝土基层上覆沥青面层的受力状态进行研究, 鉴于此, 笔者利用有限元数值分析方法, 建立多孔混凝土基层缩缝处沥青路面的三维有限元模型, 分析基层缩缝处沥青面层的荷载应力.

1 沥青面层荷载应力分析

1.1 有限元模型

根据多孔混凝土基层缩缝处沥青路面结构特点, 建立的三维有限元模型分为 3 个区域, 分别为沥青面层、多孔混凝土基层和地基. 多孔混凝土基层为符合弹性力学基本假设的有限厚度弹性层, 沥青面层可视为有限厚度弹性层. 为反映半空间地基的特性, 地基采用扩大尺寸来模拟, 地基的弹性模量为路面的底基层和路基的当量值. 假设在多孔混凝土基层中有贯穿厚度的温缩裂缝, 缩缝宽度为 0.5 cm, 且缩缝处无传荷能力. 三维有限元模型的边界条件为: 地基地边固定, 采用自由表面来模拟缩缝.

行车荷载均采用标准轴载 BZZ-100, 轮胎压力 0.7 MPa, 单个轮压作用范围 18.9 cm × 18.9

收稿日期: 2011-04-14; 修订日期: 2011-06-21

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(102102310271); 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010B580003)

作者简介: 锁利军(1975-), 男, 河北徐水人, 洛阳理工学院讲师, 博士, 主要从事路面工程研究, E-mail: lijunsuo@126.com.

cm,接触面积为 357.21 cm^2 ,双轮间距为 32 cm ,两侧轮隙间距为 182 cm .理论计算及收敛性分析表明,基层宽度在 $4 \sim 5 \text{ m}$ 范围内变化对缩缝处沥青面层的最大应力影响微小;随着基层长度增大,缩缝处沥青面层应力的增加幅度逐渐减小,基层长度大于 5 m 时,缩缝处沥青面层应力基本保持不变.据此取多孔混凝土基层的平面计算尺寸为:多孔混凝土基层长为 5 m ,宽为 4.5 m ,面层的平面尺寸同基层.经过取不同尺寸地基计算误差分析,地基长、宽和厚度尺寸拟定为 $12.01 \text{ m} \times 6.5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$.

经过不同荷位计算分析比较,车轮荷载作用在缩缝的两侧时,沥青面层底部仅为单向受拉状态,而车轮荷载作用在缩缝一侧的偏荷载不但使沥青面层处于受拉状态,而且使沥青面层承受较大剪切力,因此,车轮荷载作用在缩缝一侧的偏荷载对沥青面层最为不利,布载方式如图1、图2所示.对缩缝处单、双侧荷载对比分析得知,对称轴上的单侧荷载比双侧荷载对沥青面层产生的不利影响更大,原因在于双侧荷载的另一侧轮载的反翘曲作用抵消了对称轴上的部分应力值.因此,在计算时仅考虑对称轴上的单侧荷载作用,利用荷载作用位置的对称性,取模型的一半进行计算.路面整体结构的有限元网格划分如图3所示,为满足计算精度要求,对各关键部位,如缩缝及其附近沥青面层结构进行网格细化.如无特殊说明,图2中点A为计算点.

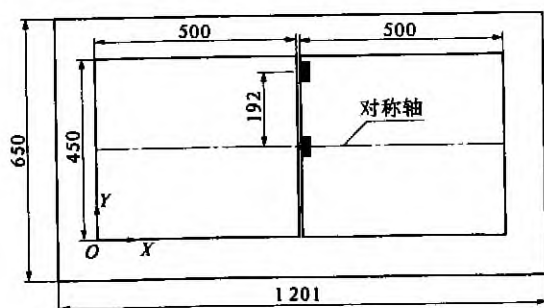


图1 车轮布载平面图(单位:cm)

Fig.1 Calculation plane model

1.2 层间接触状态模拟

多孔混凝土基层施工时,一般通过碾压成型,其上也为碾压成型的沥青层,这样就使得多孔混凝土基层与沥青面层的结合较为紧密,可认为二者之间处于连续接触状态.多孔混凝土基层下通常铺筑半刚性材料下基层或底基层,在使用过程中层间逐渐趋于光滑的接触状态.因此,在计算沥青面层应力时,对多孔混凝土基层与地基的层间接触按照绝对光滑情况进行分析.

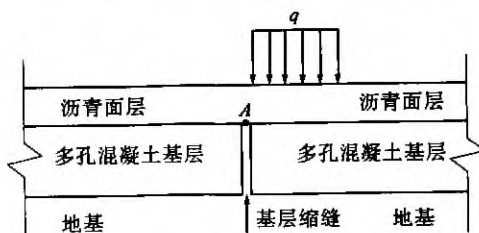


图2 缩缝处车轮荷载作用示意图

Fig.2 Calculation diagram for asphalt pavement

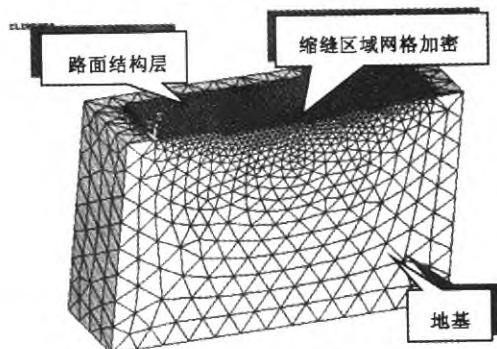


图3 路面整体结构有限元网格划分图

Fig.3 3D finite element pavement model

笔者前期提出横观各向同性弹性本构关系模型作为正交各向异性接触模型.其本构关系模型如式(1).

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

将式中的张量弹性常数表示为工程弹性常数 E_i, μ_{ij}, G_{ij} , 可得到用工程常数表示的刚度矩阵 $[C]$, 即

$$\begin{cases} C_{11} = (E_1 - E_3\mu_{13}^2)/\Delta \\ C_{12} = (E_1\mu_{12} + E_3\mu_{13}^2)/\Delta \\ C_{13} = E_3(\mu_{13} + \mu_{12}\mu_{13})/\Delta \\ C_{33} = E_3(1 - \mu_{12}^2)/\Delta \\ C_{44} = G_{13} \\ \Delta = 1 - \mu_{12}^2 - 2\frac{E_3}{E_1}\mu_{13}^2 - 2\frac{E_3}{E_1}\mu_{12}\mu_{13}^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: E_1 为各向同性面 xy 面内的弹性模量; E_3 为 z 方向的弹性模量; μ_{12} 为各向同性面 xy 面内的泊松比; μ_{13} 为表征因 z 方向受力引起 x 方向(或 y 方向)变形的泊松比; G_{13} 为 xz 平面(或 yz 平面)内

的剪切模量。

对于面层与基层之间连续接触状态,只需将正交各向异性接触模型的 $[C]$ 矩阵的参数取成与基层刚度矩阵相一致的值,就可以实现完全连续。对于基层与地基之间的光滑接触状态,选取正交各向异性接触单元的参数如表1所示。

表1 正交各向异性单元的参数取值

Tab.1 Parameters for orthotropic interface element

E_1/MPa	E_3/MPa	μ_{12}	μ_{13}	剪切模量 G_{13}/MPa
1	100 000	0.0001	0.0001	0.000 1

1.3 计算参数

沥青路面各结构层的主要计算参数见表2。

表2 主要计算参数

Tab.2 Main calculation parameters for pavement

结构层	厚度/cm	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
沥青混凝土面层	6~20	600~2 000	0.25
多孔混凝土基层	16~30	8 000~14 000	0.15
地基	800	40~100	0.30

2 沥青面层荷载应力影响因素分析

影响沥青面层荷载应力的因素主要有沥青面层厚度 h_a ,多孔混凝土基层厚度 h_c ,沥青面层模量 E_a 及基层与地基的模量比 E_c/E_s 。以下分析各因素对面层荷载应力的影响。

当沥青面层模量变化时,计算点A的最大拉应力和最大剪应力见图4(a)。当沥青面层厚度变

化时,计算点A的最大拉应力和最大剪应力见图4(b)。当基层厚度变化时,计算点A的最大拉应力和最大剪应力见图4(c)。计算点A的最大拉应力和最大剪应力随基层与地基模量比的变化趋势见图4(d)。从图4可知,沥青面层的主应力多为压应力,图4(a)中沥青面层模量超过1 600 MPa时,面层才出现了拉应力,但其值很小,因此,当沥青面层模量不超过1 600 MPa时,可以认为沥青面层处于受压状态。从图4可知,多孔混凝土基层缩缝处沥青面层内存在较大的剪应力。图4(a)表明,当 $h_a = 10\text{ cm}$, $h_c = 22\text{ cm}$, E_a 在800 MPa~2 000 MPa之间变化时对应的面层最大剪应力呈降低趋势变化。从图4(b)表明,当 $h_c = 22\text{ cm}$, $E_c/E_s = 100$, $E_a = 1\text{ 200 MPa}$ 时,沥青面层的最大剪应力随 h_a 的增大而减小。图4(c)表明,当 $h_a = 10\text{ cm}$, $E_a = 1\text{ 200 MPa}$, $E_c/E_s = 100$, h_c 在16~30 cm时,沥青面层的最大剪应力随 h_c 的增大而减小。从图4(d)可以看出,当 E_a 和 h_a 一定时,沥青面层的最大剪应力随 E_c/E_s 的增大而增大。轴载变化对面层最大剪应力的影响如图5所示,随着轴载的增加,沥青面层的最大剪应力明显增大,二者基本属于倍增关系。通过分析各因素的影响效果知,面层厚度的变化对面层剪应力的影响最为显著。因此,适当地增加面层厚度 h_a 可以有效地降低沥青面层的剪应力。

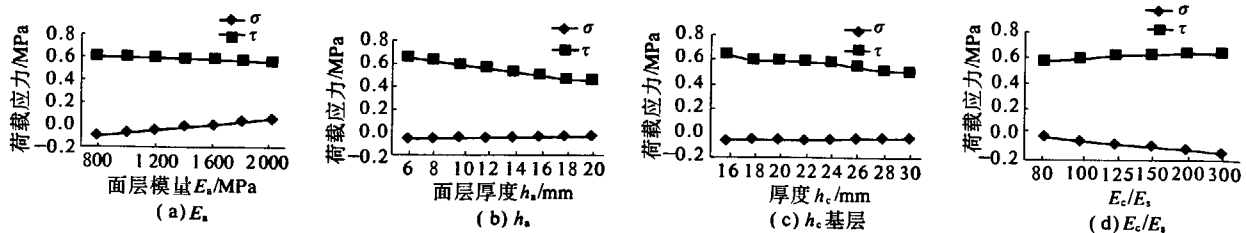


图4 $E_a, h_a, h_c, E_c/E_s$ 对荷载应力的影响

Fig.4 Effect of $E_a, h_a, h_c, E_c/E_s$ on load stress

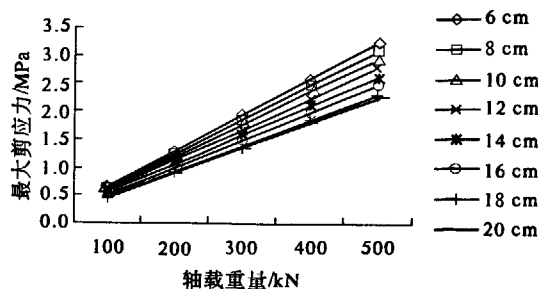


图5 轴载对面层剪应力的影响

Fig.5 Effect of axle load on shear stress

3 结论

(1) 为了反映多孔混凝土基层缩缝处沥青面层的实际受力情况,建立多孔混凝土基层缩缝处沥青路面三维有限元模型,引入横观各向同性弹性本构关系模型作为正交各向异性接触模型,实现沥青路面结构层间接触状态的数值模拟。

(2) 荷载应力分析表明,当沥青面层模量不超过1 600 MPa时,多孔混凝土基层缩缝处沥青面层处于受压状态。荷载作用下,多孔混凝土基层

缩缝处沥青面层存在较大的剪应力.当面层厚度 h_a 和基层厚度 h_b 一定时,面层最大剪应力随着面层模量的增大而减小;当面层模量和面层厚度一定时,沥青面层的最大剪应力随 E_c/E_s 的增大而增大;当基层厚度 h_b 和基层与地基模量比 E_c/E_s 一定时,随着面层厚度 h_a 的增大,沥青面层的最大剪应力减小;当面层厚度 h_a 和模量 E_s 一定时,沥青面层的最大剪应力随 h_b 的增大而减小.随着轴载的增加,沥青面层的最大剪应力明显增大,二者基本属于倍增关系.通过分析各因素的影响效果知,面层厚度的变化对面层剪应力的影响最为显著.因此,适当地增加面层厚度 h_a 可以有效地降低沥青面层内的剪应力.

(3) 荷载作用下,多孔混凝土基层缩缝处沥青面层存在较大的剪应力,荷载的反复作用极易在面层内产生剪切疲劳破坏,诱发沥青面层的剪切型反射裂缝.因此,沥青面层设计时,应选择适当的沥青面层厚度以降低面层内的剪应力,避免沥青面层剪切型反射裂缝的产生.

参考文献:

- [1] 郑木莲.多孔混凝土排水基层研究[D].西安:长安大学公路学院,2004:20-30.
- [2] 锁利军.多孔混凝土基层沥青路面结构设计方法研究[D].西安:长安大学公路学院,2005:10-30.
- [3] 胡长顺,王秉纲.复合式路面设计原理和施工技术[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [4] 杨斌.旧水泥混凝土路面沥青加铺层结构研究[D].西安:长安大学公路学院,2005:58-79.
- [5] 仰建岗,王秉纲.沥青路面贫混凝土基层应力计算[J].郑州大学学报:工学版,2006,27(1):59-62.
- [6] VON Q. Hot-mix asphalt layer thickness design for long-life bituminous pavements[J]. Transportation Research Circular, 2001, 12(5):66-68.
- [7] 孙红燕,郑传超.长寿命路面沥青层内应变曲线驼峰现象分析[J].郑州大学学报:工学版,2011,32(1):22-25.
- [8] 姚祖康.对我国沥青路面现行设计指标的评述[J].公路,2003(2):43-49.

Analysis of Load Stress of Asphalt Surface on Transverse Contraction Joint of Porous Concrete Base

SUO Li-jun¹, TONG Huai-feng¹, WANG Bing-gang², ZHENG Chuan-chao²

(1, Civil Engineering Department, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2, Key laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In this paper, three-dimension finite element model of asphalt pavement, which includes transverse contraction joint of porous concrete base and asphalt surface, is established for the purpose of analyzing load stress of asphalt surface which is located in transverse contraction joint of porous concrete base. Horizontal isotropic elasticity constitutive model is regarded as orthotropic interface model. ANSYS is employed to do mechanical analysis in asphalt surface which is located in transverse contraction joint of porous concrete base of asphalt pavement. Analysis of load stress shows that asphalt surface, which is located in transverse contraction joint of porous concrete base of asphalt pavement, is in the state of compression when the surface's modulus is no more than 1 600 MPa. Meanwhile, calculation results with the same factors are compared with each of her, and the results indicate that maximum shear stress, which is caused by load, is evident in asphalt surface which is located in transverse contraction joint of porous concrete base of asphalt pavement. Maximum shear stress decreases, decreases, decreases and increases respectively with increase of the surface's modulus, the surface's thickness, base's thickness and ratio of base's modulus to foundation's modulus.

Key words: porous concrete base; asphalt surface; orthotropic interface model; load stress; shear stress