

文章编号:1671-8879(2007)06-0011-04

多孔混凝土基层缩缝处沥青面层应力分析

锁利军,陈拴发,王秉纲

(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沥青路面的结构设计方法,通过三维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,分析多孔混凝土基层缩缝处沥青面层的荷载应力、温度应力、荷载与温度耦合作用下的耦合应力。结果表明:基层缩缝处沥青面层底面荷载主应力多为压应力值,但其剪应力在接缝处出现峰值;在温度作用下,沥青面层应力峰值点的位置在基层缩缝中点处沥青面层的底面及表面;荷载和温度耦合作用下基层缩缝中点处沥青面层底面的第一主应力介于荷载应力和温度应力之间。

关键词:道路工程;多孔混凝土基层;沥青面层;缩缝;应力

中图分类号:U416.043

文献标志码:A

Stress's numerical analysis of asphalt surface in porous concrete base's transverse contraction joint

SUO Li-jun, CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: 3D finite element model of asphalt pavement in porous concrete base's transverse contraction joint is established by 3D finite element numerical analysis method. Meanwhile, the load stress, temperature stress and coupling stress of asphalt surface in porous concrete base's transverse contraction joint are calculated and analyzed by 3D finite element method in order to study structural design method of asphalt pavement with porous concrete base. Calculating results indicate that almost all principal stresses of asphalt surface in base's transverse contraction joint are compression stress, and maximum shearing stress appears. The points of the biggest temperature stress are located in the upper and the bottom of asphalt surface in the middle of porous concrete base's transverse contraction joint, when temperature is applied to the pavement structure. When both load and temperature are applied to the pavement structure, the first principal stress in the bottom of asphalt surface in the middle of porous concrete base's transverse contraction joint is between load stress and temperature stress. 8 tabs, 5 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; porous concrete base; asphalt surface; transverse contraction joint; stress

收稿日期:2006-10-22

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200631800005)

作者简介:锁利军(1975-),男,回族,河北徐水人,博士研究生,E-mail:lijunsuo@126.com.

0 引言

多孔混凝土基层沥青路面是一种新型路面结构,其结构设计方法目前在中国尚属空白。研究表明^[1-3],多孔混凝土作为沥青路面的基层与一般半刚性基层相比,其强度高、抗冲刷性能好、排水能力强、稳定性好。多孔混凝土作为沥青路面的基层,可以有效地缓解沥青路面的水损坏。但是,多孔混凝土基层本身存在温缩,故常需设置缩缝。多孔混凝土基层的缩缝处易产生应力集中,导致沥青面层底部开裂,从而引发沥青面层产生反射裂缝。本文利用有限元分析方法,建立沥青路面的三维有限元模型,分析多孔混凝土基层缩缝处沥青面层的荷载应力、温度应力和荷载与温度耦合作用下的耦合应力。

1 沥青面层荷载应力计算与分析

1.1 有限元模型与参数

1.1.1 有限元模型

建立三维有限元模型,将多孔混凝土基层缩缝处沥青路面分为 3 个区域,分别为沥青面层、多孔混凝土基层和地基。研究表明,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^[4-6]。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 cm,接触面积为 357.21 cm²,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 4~5 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 5 m,宽 4.5 m,面层的平面尺寸同基层。经过取地基不同尺寸计算误差分析,地基长、宽和厚度尺寸拟定为 12.01 m×6.5 m×8 m。

经过不同荷位计算分析比较,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,原因是,双侧荷载的另一侧荷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 1 为计算点^[7-9]。

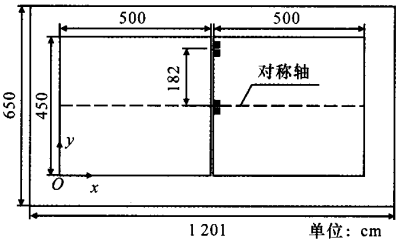


图 1 车轮布载平面

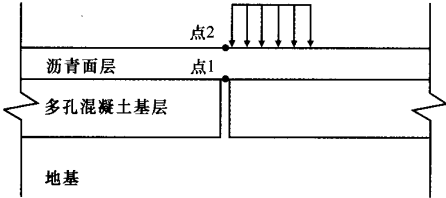


图 2 缩缝处车轮荷载作用

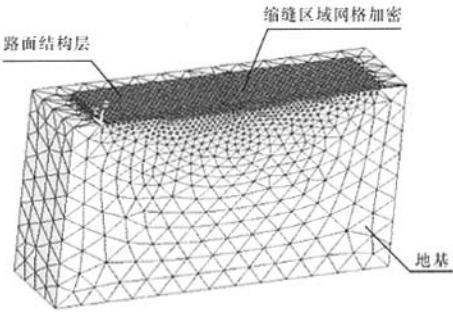


图 3 路面整体结构有限元网格划分

1.1.2 计算基本参数

各结构层主要计算参数见表 1。

表 1 主要计算参数

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

注:地基的弹性模量为下基层、垫层和路基的当量值,多孔混凝土基层模量与地基模量比为 80~300。

1.2 荷载应力计算结果分析

计算点 1 的荷载应力 σ_1 (σ_s 为等效应力, τ_{\max} 为最大剪应力),计算结果见表 2~表 5。荷载应力计

算结果表明,基层缩缝处沥青面层底面的荷载应力多为压应力值,只有当沥青面层的模量较大时,才会出现较小的拉应力,但其值不会超过材料的抗拉强度而使路面开裂。这说明,对于多孔混凝土基层沥

青路面,在基层缩缝处仅有荷载作用时,面层拉应力值很小,但剪应力在缩缝处出现峰值,说明此时路面是否开裂主要取决于剪应力的集中作用。

表 2 沥青面层荷载应力随面层模量(E_a)变化的计算结果 ($\sigma_s=2\tau_{\max}$)

E_a/MPa	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800	2 000
σ_1/MPa	-0.103 646	-0.078 015	-0.052 134	-0.026 100	0.000 045	0.026 287	0.052 619
σ_s/MPa	1.176 43	1.184 69	1.179 04	1.166 26	1.150 16	1.132 95	1.115 96

表 3 沥青面层荷载应力随基层模量与地基模量比(E_c/E_s)变化的计算结果 ($\sigma_s=2\tau_{\max}$)

E_c/E_s	80	100	125	150	200	300
σ_1/MPa	-0.023 724	-0.052 134	-0.076 727	-0.094 081	-0.116 784	-0.140 195
σ_s/MPa	1.135 89	1.179 04	1.216 09	1.240 16	1.264 39	1.267 18

表 4 沥青面层荷载应力随面层厚度(h_a)变化的计算结果 ($\sigma_s=2\tau_{\max}$)

h_a/cm	6	8	10	12	14	16	18	20
σ_1/MPa	-0.057 7	-0.054 9	-0.052 1	-0.049 4	-0.046 7	-0.043 9	-0.041 2	-0.039 9
σ_s/MPa	1.304 0	1.241 5	1.179 0	1.117 3	1.055 0	0.992 4	0.930 7	0.903 2

表 5 沥青面层荷载应力随基层厚度(h_c)变化的计算结果 ($\sigma_s=2\tau_{\max}$)

h_c/cm	16	18	20	22	24	26	28	30
σ_1/MPa	-0.056 5	-0.052 6	-0.052 5	-0.052 1	-0.051 1	-0.048 0	-0.045 7	-0.044 8
σ_s/MPa	1.276 9	1.189 7	1.187 3	1.179 0	1.154 5	1.085 1	1.032 4	1.014 1

2 沥青面层温度应力计算与分析

2.1 计算模型与参数

路面结构有限元模型及其有限元网格划分与荷载应力计算相同。计算点为图 2 中的点 1 和点 2。

温度应力分析时材料参数见表 6。

表 6 温度应力分析时的材料参数

材料种类	沥青面层	多孔混凝土基层	地基
导热系数/($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$)	1.2	1.1	1.0
泊松比	0.25	0.15	0.35
模量/MPa	600~2 200		
热膨胀系数/($^\circ\text{C}$) $^{-1}$	21×10^{-6}	5×10^{-6}	5×10^{-6}
厚度/cm	6~20	16~30	

分析温度应力时,应先分析路面结构的温度场,对于基层的温度场,当基层厚度一定时,其温度梯度主要表现为基层的温差^[10]。因此,设置基层温差为 $2\text{ }^\circ\text{C}\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$,通过三维有限元数值方法计算沥青面层的温度应力。

2.2 温度作用下沥青面层应力峰值点位置

通过计算可知,当沥青面层表面温度升高时,路面结构发生膨胀及向下翘曲变形,缩缝处沥青面层底面受压,沥青面层底部不易产生开裂。因此,在分析温度应力时,只考虑降温情况。为确定基层缩缝处沥青面层应力峰值点的位置,计算降温过程中基层温差取 $10\text{ }^\circ\text{C}$,对多孔混凝土基层沥青路面进行温

度应力路径分析,计算结果见图 4、图 5。

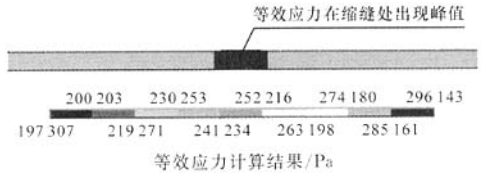


图 4 沥青面层层顶处等效应力沿 X 轴变化

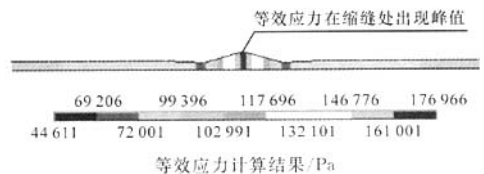


图 5 沥青面层层底处等效应力沿 X 轴变化

从图 4、图 5 可知,当沥青面层厚度为 10 cm 、沥青面层模量为 $1\text{ }200\text{ MPa}$ 、基层模量与地基模量比为 100 、基层厚度为 22 cm 时,沥青面层底面及表面的最大等效应力分别为 $0.176\text{ }966\text{ MPa}$ 和 $0.296\text{ }143\text{ MPa}$,沥青面层底面及表面的最大主应力分别为 $0.079\text{ }185\text{ MPa}$ 和 $0.312\text{ }831\text{ MPa}$,这些峰值均出现在缩缝中点处。计算点偏离缩缝处后,以上数值则明显降低,说明温度应力在缩缝处产生了应力集中现象。通过以上分析可知,在温度作用下,沥青面层应力峰值点的位置在基层缩缝中点处沥青面层的底面及表面。

通过计算分析可知,对于温度变化的作用,如果

降温梯度较大或降温速度较快,产生的温度应力比较大,这个应力值有可能超过沥青材料的抗拉强度,导致路面开裂。计算点 2 的位置在沥青面层表面,降温过程中沥青面层收缩而产生温度应力,与沥青面层的性能关系较大,沥青路面设计应是材料与结构一体化,设计时应重视沥青面层表面的温缩应力。对于多孔混凝土基层沥青路面结构设计而言,防止沥青面层反射裂缝的产生是关键问题,而反射裂缝的产生同沥青面层底部产生的拉应力密切相关。因此,在路面结构设计中,主要考虑沥青面层底部(计算点 1)的温度应力值。

3 沥青面层耦合应力计算与分析

沥青路面通车后,往往要承受荷载和温度的共

表 7 荷载与温度耦合作用下沥青面层计算点 1 的耦合应力计算结果

E_c/E_s	80	100	125	150	200	300
耦合应力/MPa	0.005 835 0	0.008 255 6	0.010 197 1	0.011 432 9	0.012 750 5	0.013 292 3

表 8 不同类型荷载作用下沥青面层计算点 1 的应力计算结果

E_c/E_s	80	100	125	150	200	300
荷载应力(100 kN)/MPa	-0.023 720	-0.052 134	-0.076 727	-0.094 081	-0.116 784	-0.140 195
温度应力(10 ℃)/MPa	0.075 874	0.079 185	0.084 222	0.089 832	0.101 817	0.126 107
耦合应力/MPa	0.005 835 0	0.008 255 6	0.010 197 1	0.011 432 9	0.012 750 5	0.013 292 3

沥青面层计算点 1 的应力介于荷载应力和温度应力之间。在荷载和温度耦合作用下,沥青面层底面的拉应力小于温度应力,原因是,在降温过程中,基层的变形导致沥青面层底部产生拉应力,而荷载作用于基层缩缝的一侧时,沥青面层层底承受压应力,抵消了温度荷载产生的部分拉应力。

4 结 语

(1)根据多孔混凝土基层缩缝处沥青路面的结构特点,建立了基层缩缝处沥青面层应力分析模型。

(2)荷载应力分析表明,基层缩缝处沥青面层底面荷载应力多为压应力,只有当沥青面层的模量较大时,才会出现较小的拉应力,但其值不会超过材料的抗拉强度而使路面开裂。这说明,对于多孔混凝土基层沥青路面,在基层缩缝处仅有荷载作用时,面层拉应力值很小。但剪应力值在接缝处出现峰值,此时路面是否开裂主要取决于剪应力的集中作用。

(3)温度应力分析表明,在温度作用下,沥青面层应力峰值点的位置在基层缩缝中点处沥青面层的底面及表面。对于多孔混凝土基层沥青路面结构设计而言,防止沥青面层反射裂缝的产生是关键问题,而反射裂缝的产生同沥青面层底面产生的拉应力大

同作用,因此在前面分析的基础上,需对荷载和温度耦合作用下沥青面层的受力情况进行计算与分析。

3.1 计算模型与参数

路面结构模型及其有限元网格划分与荷载应力计算时相同,耦合分析时,将荷载和温度共同作用在路面结构上。主要计算参数见表 1、表 6。计算点为图 2 中的点 1。

3.2 耦合应力计算结果与分析

主要计算参数:沥青面层厚度 10 cm,沥青面层模量 1 200 MPa,多孔混凝土基层厚度 22 cm,车辆荷载 100 kN,基层温差 10 ℃,其余的参数同表 1、表 6。沥青面层耦合应力计算结果见表 7;不同类型荷载作用下沥青面层应力计算结果见表 8。

从表 8 计算结果可知,荷载和温度耦合作用下

小相关。因此在路面结构设计中,主要考虑沥青面层底面(计算点 1)的温度应力值。

(4)耦合应力分析表明,荷载和温度耦合作用下沥青面层计算点 1 的应力介于荷载应力和温度应力之间,并且耦合应力小于温度应力。

参考文献:

References:

- [1] 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, 2005.
- [2] 郑木莲,王秉纲,胡长顺. 多孔混凝土疲劳性能的研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 7-11.
ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Study of fatigue property of porous concrete [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 7-11.
- [3] 郑木莲. 多孔混凝土排水基层研究[D]. 西安:长安大学, 2004.
- [4] 武建民,伍石生. 用三维有限元方法评价带接缝的旧水泥混凝土路面罩面[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2002, 22(1): 10-13.

(下转第 43 页)

(3) 路桥过渡段路基加固的不同区域对结构刚度的贡献排序为:固定端附近区域—中间偏上区域—中间偏下区域—路基顶面远端区域。

(4) 拓扑优化结果表明,路基加固体布置区域主要取决于面力荷载布置长度和加固面积大小。但路基加固体底面布置长度应不小于 2 m,由下向上斜率应缓于 1:1。

参考文献:

References:

- [1] 杜海珍,荣见华,傅建林,等.基于应变能的结构拓扑优化设计[J].交通运输工程学报,2004,4(3):34-37.
DU Hai-zhen, RONG Jian-hua, FU Jian-lin, et al. Structural topology optimization design based on strainenergy[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(3):34-37.
 - [2] 刘代全,刘晓明,龙正聪.桥头跳车力学分析及台背刚柔过渡设计参数[J].公路,2002,(6):81-84.
LIU Dai-quan, LIU Xiao-ming, LONG Zheng-cong. Mechanical analysis of bump at bridge-head and discussion of rigid-flexibility transition design parameters of abutment back[J]. Highway, 2002, (6):81-84.
 - [3] 俞永华,谢永利,杨晓华.桥头楔形柔性搭板作用性状的仿真[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(6):29-32.
YU Yong-hua, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Simulation of active mechanics of wedge flexible approach slab at bridge abutment[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6):29-32.
 - [4] 杨晓华,戴铁丁,许心桩.土工格室在铁路软弱基床加固中的应用[J].交通运输工程学报,2005,5(2):12-17.
YANG Xiao-hua, DAI Tie-ding, XU Xin-zhuang. Geocell application in reinforcing soft subgrade of railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(2):12-17.
 - [5] 丁洲祥,龚晓南,李又云,等.考虑变质量的路基沉降变形协调分析法[J].中国公路学报,2005,18(2):6-11.
DING Zhou-xiang, GONG Xiao-nan, LI You-yun, et al. Method of stress-deformation compatibility analysis considering variable mass for roadbed settlement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2):6-11.
 - [6] 刘保健,谢永利,李又云.公路软基在变荷载条件下的沉降计算[J].中国公路学报,2000,13(4):21-25.
LIU Bao-jian, XIE Yong-li, LI You-yun. Settlement calculation of highway soft foundation under the changeable load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000,13(4):21-25.
 - [7] 许素强,夏人伟.结构优化方法研究综述[J].航空学报,1995,16(4):385-396.
XU Su-qiang, XIA Ren-wei. Methods of structural optimization: an overview[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1995,16(4):385-396.
- *****
- (上接第14页)
- WU Jian-min, WU Shi-sheng. Evaluating of overlay on cement concrete slab with joints by 3D FEM[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(1):10-13.
 - [5] 陈飞,张宁.刚性路面传力杆接缝传荷能力评价新方法[J].交通运输工程学报,2006,6(4):47-51.
CHEN Fei, ZHANG Ning. New load-transferred evaluating method at doweled joint of rigid pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(4):47-51.
 - [6] 黄志义,王金昌.含裂缝沥青混凝土路面的粘弹性断裂分析[J].中国公路学报,2006,19(2):19-23.
HUANG Zhi-yi, WANG Jin-chang. Viscoelastic fracture analysis of asphalt concrete pavement with cracks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(2):19-23.
 - [7] 黄仰贤.路面分析与设计[M].北京:人民交通出版社,1994.
 - [8] 姚祖康.路面[M].北京:人民交通出版社,1998.
 - [9] Manuel J C M, Jorge C P. Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method[J]. Transportation Research Record, 2005, 1919:96-110.
 - [10] 陈拴发,郑木莲.破裂水泥混凝土路面沥青加铺层温度应力影响因素[J].交通运输工程学报,2005,5(3):25-29.
CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian. Thermal stress influence factors of asphalt overlay on cement concrete pavement cracking slab[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(3):25-29.