

文章编号: 0451-0712(2006)12-0066-05

中图分类号: U419.92; U416.217

文献标识码: A

# 多年冻土地区沥青混凝土路面材料 对结构附加应力的影响

马 强<sup>1</sup>, 姬杨蓓蓓<sup>2</sup>, 王秉纲<sup>1</sup>

(1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室 西安市 710064; 2. 同济大学 上海市 200092)

**摘 要:** 多年冻土地区路面结构出现大量早期损坏, 究其原因, 与多年冻土地区独特的工程特点有直接关系。多年冻土地区路基的融沉变形使沥青混凝土路面结构层产生附加应力, 其与荷载应力的综合作用, 直接导致路面结构的破坏。采用有限元法, 并将融沉变形简化为二次曲线, 建立沥青混凝土路面结构的横向计算模型。计算分析了路面材料与基层底面附加应力的变化关系, 并得出附加应力的主要影响参数, 为多年冻土地区路面的结构设计提供依据。

**关键词:** 道路工程; 附加应力; 有限元法; 路面材料; 多年冻土; 不均匀融沉变形

多年冻土是指冻结状态持续 3 年或 3 年以上的土层。多年冻土地区的表土层, 有时夏季融化、冬季冻结, 所以也属于季节性冻土。多年冻土的路基几乎都有沉陷病害, 均匀的沉降变形对路基和路面不会产生较大的影响, 而不均匀的变形则会对路面使用造成危害。研究表明, 不均匀融沉变形使路面结构内部产生较大的附加应力, 同时在行车荷载的反复作用下, 致使路面出现种种早期破坏。有时由于融沉变形引起的路面破坏甚至比行车荷载要大得多, 而我国现行沥青混凝土路面设计规范不能囊括所有地区的特点, 只考虑了行车荷载的作用。多年冻土地区的路面设计, 有必要考虑路基不均匀融沉变形对沥青混凝土路面结构的影响。因此, 路面设计不仅要考虑不均匀融沉变形对结构的影响, 路面材料也应该针对多年冻土地区的工程特点进行设计。

为此, 本文采用有限元法, 对不同沥青混凝土路面结构在路基横向不均匀融沉变形下的结构横向附加应力进行计算, 分析路面材料参数的影响, 为附加应力计算方法研究提供依据。

## 1 路基融沉变形分析

冻土土层解冻融化后, 由于土层上部集聚的冰晶体融化, 形成无法下渗的冻结层上水, 使路基含水

量大大增加, 路基强度降低, 在行车荷载和路堤自重作用下, 路基会产生融沉变形。有关研究结论表明, 采用 Biot 固结理论计算得出的融沉变形结果与实际观测值非常相似。然而, 融沉变形的形状和大小对路面结构也有很大的影响。本文主要是针对路面结构材料特性与融沉变形的关系进行分析, 为了使不同材料性质与融沉变形的关系有可比性, 因此对融沉变形的形状进行简化, 假设其为二次曲线。

因而, 计算分析中采用二次曲线表征路基的不均匀融沉变形, 融沉盆半径取 4.5 m, 融沉深度取 5 cm。前期研究表明, 路基横向不均匀融沉变形在沥青混凝土路面结构面层内均产生压应力, 且压应力值远远小于沥青混合料的极限抗压强度。本文计算分析中, 仅考虑路基不均匀变形在路面结构基层内产生的附加拉应力。

## 2 计算模型

考虑到路面结构为带状结构物, 路基横向不均匀融沉变形对路面纵向的影响很小, 建立二维轴对称路面结构有限元模型, 可以有效地模拟横向不均匀融沉变形对路面结构的影响。计算模型如图 1 所示。在有限元计算中不考虑阴阳坡的差异, 路面中心为水平约束, 竖直方向无约束, 融沉变形的半径取

路面半幅宽度,路面表面与侧面为自由边。

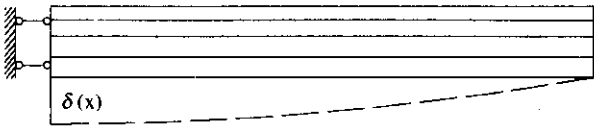


图 1 计算模型

根据前期研究成果,选择目前常用的单层半刚性基层沥青混凝土路面结构2、复合半刚性基层沥青混凝土路面结构1和设置级配碎石过渡层的沥青混凝土路面结构3,其结构组合、层厚和材料类型参见图2。路面结构层的基本计算参数取值及计算参数的变化范围见表1。

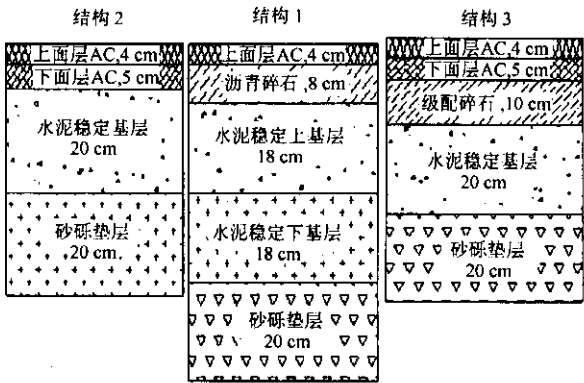


图 2 路面结构组合

表 1 路面结构层计算参数取值及变化范围

材料类型	中粒式 AC	粗粒式 AC	沥青碎石	级配碎石	5%水泥稳定砂砾	4%水泥稳定砂砾	砂砾垫层	土基
层厚 $h/\text{cm}$	4	5	8	10	20(复合基层为 18)	18	20	—
层厚变化范围/cm	—	3~7	0~14	0~14	10~35 10~30(复合基层)	10~30	0~30	—
模量 $E/\text{MPa}$	1 200	1 100	700	300	1 300	800	200	45
模量变化范围/MPa	800~1 800	700~1 700	600~1 000	200~500	600~1 800	600~1 800	100~300	20~70
泊松比	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.35

3 路面材料参数分析

3.1 垫层材料参数的影响

为了单一分析垫层材料参数的影响,采用单独改变垫层的厚度、模量而固定其他结构层参数的方法,计算两种路面结构组合下基层底面的附加应力。具体计算参数取值为:垫层厚度变化范围为 0~30 cm,每 5 cm 为一级;垫层模量变化范围为 100~300 MPa,每 50 MPa 为一级;其他结构层厚度与模量取值见表 1。

(1) 垫层模量影响分析。

路基的不均匀融沉变形在路面结构基层底面均产生附加拉应力。由图 3 描述的基层(底基层)底面融沉盆中心位置的附加拉应力随垫层模量的变化情况可得:基层(底基层)底面拉应力随垫层模量的增大线性减小;具有复合半刚性基层的路面组合,基层层底的拉应力明显小于底基层层底的拉应力,当垫层模量为 100 MPa 时,结构 1 底基层的层底拉应力比基层约大 192.75%;复合半刚性基层底面拉应力比单层半刚性基层底面的拉应力小,如模量在 100 MPa 时,结构 1 底基层底面拉应力比结构 2 基层底面拉应力小 71.4%。由此可见,复合半刚性基层可以有效地改善路面基层在路基不均匀融沉变形下的

受力状态。

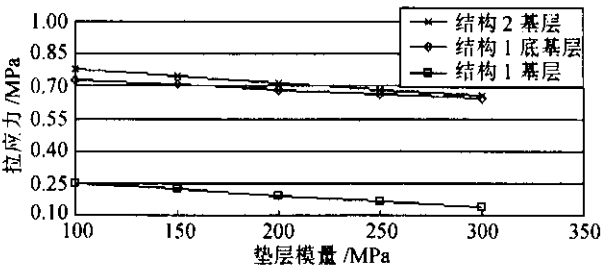


图 3 基层(底基层)底面拉应力与垫层模量关系

(2) 垫层厚度影响分析。

基层底面最大拉应力与垫层厚度的变化关系如图 4 所示。由图 4 可见,砂砾垫层的设置可以有效降低基层附加应力,随着砂砾垫层厚度的增加,拉应力呈线性减小。对于两种路面结构组合,曲线变化趋势基本一致。

综合上述分析,垫层模量和厚度的增大均使基层底面附加拉应力减小。因此,当路基的融沉深度较大,路基状况不好时,提高垫层的模量(如改变材料性质或增大压实度),或增大垫层厚度,可有效地提高路面结构对路基不均匀融沉变形的适应能力。

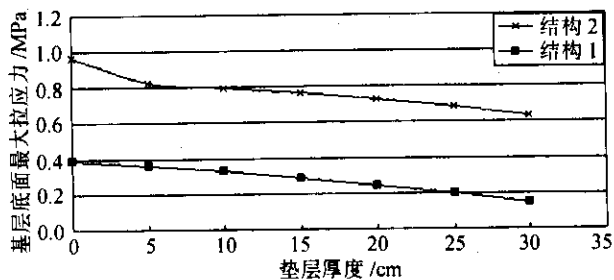


图4 基层底面最大拉应力与垫层厚度关系

### 3.2 基层材料参数的影响

改变基层的厚度和模量,保持其他参数不变,计算不同路面结构组合的融沉附加应力。具体计算参数取值为:基层模量变化范围为600~1 800 MPa,每100 MPa为一级;基层厚度变化范围为10~35 cm,底基层厚度变化范围为10~30 cm,每5 cm为一级;其他结构层厚度与模量取值见表1。

#### (1) 基层(底基层)模量影响分析。

对于复合基层路面结构1,计算分析中分别考虑基层模量和底基层模量对基层底面拉应力的影响。由图5所示的基层底面最大拉应力的变化关系可知:基层的层底最大拉应力随基层模量的增加而近似线性增大,两种结构的变化趋势相近;随底基层模量的增大而减小(结构1)。结合垫层模量影响分析结果可得,基层模量对基层底面最大拉应力的影响比垫层模量的影响显著,底基层模量和垫层模量的增大均可减小基层底面附加拉应力。

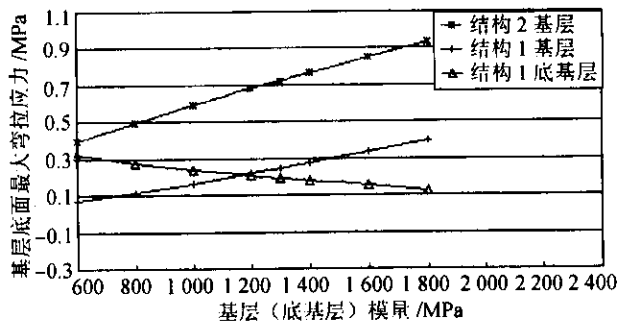


图5 基层底面最大拉应力与基层(底基层)模量关系

#### (2) 基层厚度影响分析。

由图6所示基层厚度对其底面最大拉应力的影响可得,基层底面最大拉应力随其厚度的增加而线性增大,两种结构线性变化的规律基本相同。同时,设置复合半刚性基层的结构1的基层底面最大拉应力比结构2的拉应力小得多,且当基层厚度较小时结构1甚至处于受压状态。结合垫层厚度的影响分

析结果,基层厚度对路面结构基层底面最大拉应力的影响比垫层厚度的影响显著。

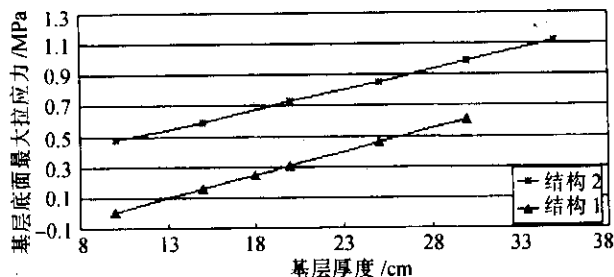


图6 基层底面拉应力与基层厚度关系

对于设置了复合半刚性基层的结构1,基层厚度和底基层厚度与基层底面的最大拉应力的变化关系相反,因此进一步对比分析基层和底基层厚度对基层底面最大拉应力的影响关系。如图7所示,基层底面最大拉应力随基层厚度的增大而增加,随底基层厚度的增大而减小。因此,当融沉附加应力较大时,可采用复合半刚性基层的路面结构,增大底基层的厚度以减小融沉附加应力。

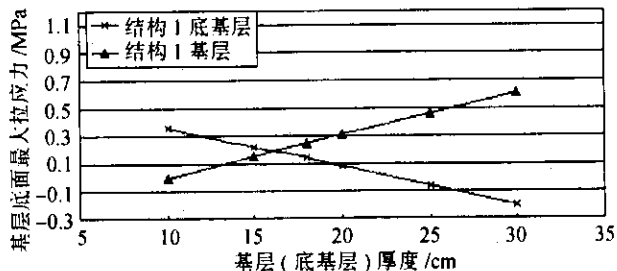


图7 基层底面最大拉应力与结构1基层(底基层)厚度关系

我国现行规范以荷载作用下的基层底面拉应力为设计指标,确定路面结构层厚度。从减小路表弯沉、提高路面整体承载能力方面考虑,基层材料的模量越高、基层厚度越厚越有利。但从前述分析可得,如果基层模量越高、厚度越大,会导致附加应力明显增大,使路面基层被拉裂。而底基层的模量越高、厚度越大,可有效减小附加应力,起到保护基层的作用。因此,对于多年冻土地区沥青混凝土路面结构设计,应综合考虑路基的不均匀融沉变形和荷载的双重作用,合理选择基层和底基层材料模量并确定其厚度。

### 3.3 面层材料参数的影响

改变面层的厚度、模量,其他结构层参数取定值,计算结构2的附加拉应力。具体计算参数取值

为:面层模量变化范围为 800~1 800 MPa,每 200 MPa 为一级;面层厚度变化范围为 3~7 cm,每 1 cm 为一级;其他结构层厚度与模量取值见表 1。初步计算分析表明,上面层的模量和厚度对附加应力的影响很小,本文仅考虑下面层的厚度和模量的影响。

(1)下面层模量影响分析。

由图 8 可得,随着下面层模量的增大,基层底面最大拉应力线性增大。当下面层模量从 800 MPa 增大到 1 000 MPa 时,基层层底最大拉应力增大 3.34%。当基层模量从 800 MPa 增大到 1 000 MPa 时,基层层底最大拉应力增大 19.03%。因此,面层模量对基层层底最大拉应力的影响显然没有基层模量的影响显著。

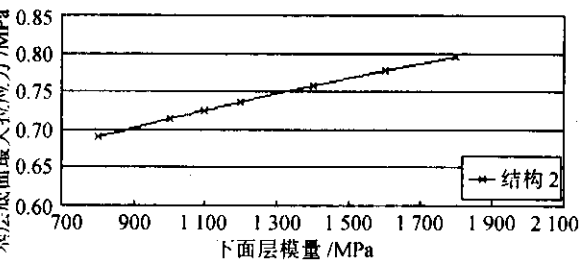


图 8 基层层底拉应力与下面层模量关系

(2)下面层厚度影响分析。

图 9 表明,基层层底最大拉应力随下面层厚度的增大而线性增大。面层厚度的变化对基层层底拉应力大小的影响,小于基层厚度变化对层底拉应力的影响。结构 2 的下面层厚度从 3 cm 增大到 4 cm 时,基层层底最大拉应力仅增大 5.08%。

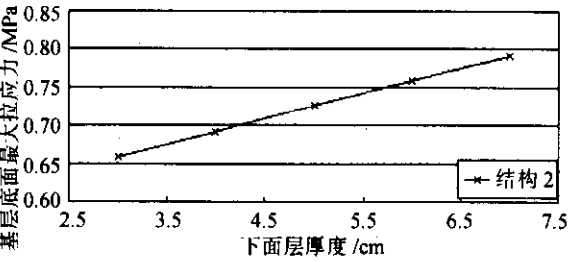


图 9 基层层底拉应力与下面层厚度关系

从以上分析可知,面层材料参数对路面结构附加应力的影响很小,在路面结构设计中可不作为主要参数予以考虑。

3.4 柔性夹层材料参数的影响

由于多年冻土地区沥青混凝土路面的特殊要求,在沥青混凝土面层和基层之间设置了柔性夹层。柔性夹层采用沥青碎石和级配碎石,起到隔热保温的作用<sup>[4]</sup>。为了分析柔性夹层的设置对基层层底附

加拉应力的影响,单独改变柔性夹层的厚度、模量,固定其他结构层参数,计算不同路面结构组合下的附加应力。具体计算参数取值为:沥青碎石柔性夹层模量的变化范围为 600~1 000 MPa,每 100 MPa 为一级;级配碎石柔性夹层模量的变化范围为 200~500 MPa,每 50 MPa 为一级;柔性夹层厚度的变化范围为 0~14 cm,每 2 cm 为一级;其他结构层厚度与模量取值见表 1。

(1)柔性夹层模量影响分析。

如图 10 所示,结构 1 采用的沥青碎石模量大于结构 2 级配碎石的模量,随着柔性夹层材料模量的增大,基层层底最大附加应力线性增大。两种结构隔热材料模量对附加应力的影响基本相同,但设置复合半刚性基层的结构 1 的附加应力明显小于结构 2。由此可见,复合半刚性基层与柔性夹层的组合既有利于提高路面的承载能力,又可以明显改善路面结构的导热性能和减小路基不均匀融沉变形对路面结构的影响,在多年冻土地区应优先考虑使用此结构。

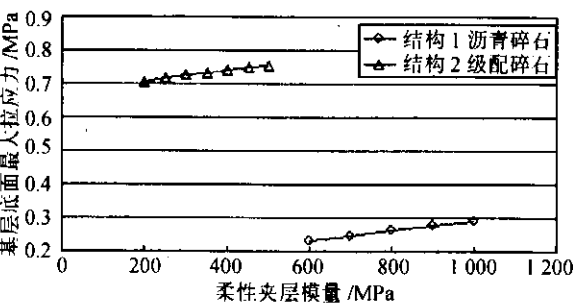


图 10 基层层底最大拉应力与柔性夹层模量关系

(2)柔性夹层厚度影响分析。

结构 2 的基层层底最大拉应力随柔性夹层厚度的变化关系如图 11 所示。柔性夹层厚度每增加 2 cm 时,结构 2 基层层底最大拉应力增大 5.89%,可见设置级配碎石柔性夹层的结构只能在物理上起到保温的作用,在路面结构计算中反而使基层层底附加应力增大,但增大并不显著。

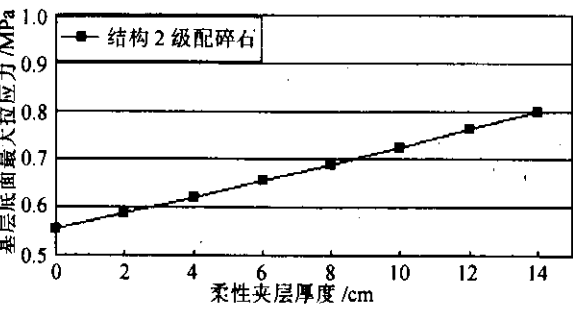


图 11 基层层底最大拉应力与柔性夹层厚度关系

4 结语

针对多年冻土地区路基不均匀融沉变形在路面结构内产生横向附加应力这一特殊性,本文采用有限元法建立了路基发生不均匀融沉变形时路面结构的计算模型,计算分析路面材料参数对附加应力的影响。结果表明:(1)基层和底基层材料参数的变化对附加应力的影响最为显著,且设置底基层的结构可以有效改善结构基层附加应力的大小,因此建议多年冻土地区路面结构应采用复合半刚性基层,可以有效地减少不均匀融沉变形对路面基层的影响;(2)路面结构中加入垫层可以阻止冻土地下毛细水进入路面结构,并且大大地改善了路面结构的受力情况,在多年冻土地区路面结构一定要设置垫层;(3)面层材料参数对附加应力的影响不显著;(4)柔性夹层作为路面结构的保温层,有效地保护了路基

的温度场,柔性夹层的物理作用(起到隔热的作用)是不容忽视的,在很大程度上,保护了多年冻土地区路面结构的温度场。尽管路面结构计算中柔性夹层的设置反而使附加应力增大,但增大并不显著。因此,应该在冻土地区路面设计中设计合理的柔性夹层厚度。

参考文献:

[1] 藏恩穆,王贵荣. 多年冻土退化与道路工程[M]. 兰州大学出版社,1999.  
[2] 奚明键,胡长顺,多吉罗布,何子文. 青藏公路路面病害成因分析[J]. 冰川冻土,2003,25(8).  
[3] 姚祖康. 对国外沥青路面设计指标的评述[J]. 公路,2003,(3).  
[4] 姬杨蓓蓓. 多年冻土地区沥青路面结构设计方法研究[D]. 长安大学,2005.

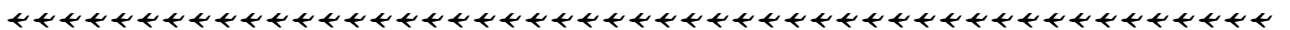
Effect of Asphalt Concrete Pavement Material in Permafrost Zone on Additional Stress of Structure

MA Biao<sup>1</sup>, JIYANG Bei-bei<sup>2</sup>, WANG Bing-gang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Because there usually exists the universal phenomenon of non-uniform melt settlement deformation in permafrost zone, early pavement destruction appears in the pavement structure. The shape of settlement deformation of subgrade is simplified to a conic curve, and the transverse calculation model of asphalt pavement structure is built using finite element method. The additional stress of asphalt pavement is calculated and the relation between additional stress and parameters of pavement material is analysed, and the main effective parameters are got, which can provide the reference for design of asphalt concrete pavement in permafrost zone.

**Key words:** road engineering; additional stress; finite element method; pavement material; permafrost; non-uniform melt settlement deformation



京 沪 高 速 公 路 天 津 段 建 成 通 车

2006 年 11 月 29 日,京沪高速公路天津段建成通车,标志着京沪高速公路按规划实现全线贯通。至此,天津市高速公路通车里程已经达到 694 km。

京沪高速公路天津段分两期建设,其中一期工程泗村店至当城互通立交 41 km 段已于今年 7 月底建成通车。二期工程起自当城互通立交,止于静海县大张屯南,主线长 49 km,同时建设的还有沟通唐津高速公路及津沧高速公路(原京沪代用线)的联络线 7 km。

京沪高速公路天津段建成通车,对完善国家高速公路网,促进我国东北、华北与华东及东南沿海地区的经济发展与交流具有重要意义。