

## 重载对以弹性模型表征的沥青路面使用性能的影响

王旭

(中交路建交通科技有限公司, 北京 100121)

**摘要:** 利用 ABAQUS 有限元分析软件, 采用弹性本构模型表征沥青混合料的材料性质, 结合 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》, 分析重载对沥青路面使用性能的影响。结果表明, 路表弯沉随着轴重的增长呈线性增长, 重载会大大降低结构承载能力; 重载作用使路面结构产生相同永久变形量所需荷载作用次数急剧降低; 随着轴重的增加, 中面层中的剪应力线性增长, 加速沥青路面的剪切破坏; 沥青面层和无机结合料层的疲劳寿命随轴重的增加呈幂函数形式减小; 土基顶面产生相同压应变所需轴载作用次数随轴重的增加急剧减小。

**关键词:** 公路; 沥青路面; 重载; 使用性能; 弹性模型

**中图分类号:** U416.217

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2020)02-0078-04

目前, 高速公路和干线公路交通任务繁重, 重载交通突出; 超载现象普遍存在, 许多地区载重汽车的超载率平均超过 50%。载重汽车的超载运输使车辆的轴载超出限制值, 轮胎气压、轮胎与路面的接触面积和接地压强增大, 导致公路出现不同程度损坏, 很多公路的使用寿命达不到设计年限, 甚至出现“今年修、来年坏”的现象。为明确沥青路面的破坏机理, 预防重载对沥青路面的早期损坏, 降低养护和二次建设费用, 该文利用有限元分析软件 ABAQUS, 从力学角度建立半刚性基层沥青路面弹性模型, 定量分析重载交通对沥青路面使用性能的影响。

## 1 理论基础

### 1.1 重载讨论

实际上, 轮胎和路面的作用面积不是圆形而是椭圆形, 可近似看成由 2 个半圆和 1 个矩形组成。为了在有限元中方便确定加载区域, 根据面积相等的原则, 将其简化成 1 个宽为  $0.6L$  的矩形(见图 1)。

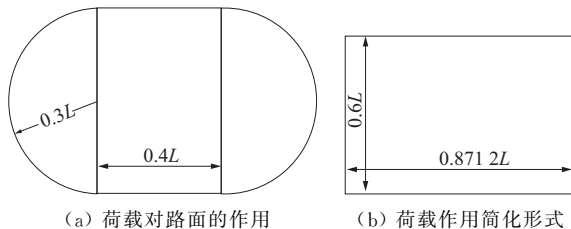


图 1 荷载作用示意图

根据比利时轴压比与轴载比的经验公式[见式(1)、式(2)], 分别计算单轴双轮轴重为 100 kN, 超载率为 30%、50%、80%、100%、150%、200%时的

接地面积、接地半径和接地压强, 结果见表 1。

$$A = (0.008P + 152) \pm 70 \quad (1)$$

$$\frac{P_i}{P_s} = \left( \frac{P_i}{P_s} \right)^{0.65} \quad (2)$$

式中:  $A$  为轮胎接地面积;  $P$  为每个轮胎的荷载;  $P_i$ 、 $P_s$  分别表示换算接地压强和标准接地压强 0.7 MPa;  $P_i$ 、 $P_s$  分别表示换算轴重和标准轴重 100 kN。

表 1 不同重载下等效矩形的长和宽

超载比	实载轴重/kN	接地压强/MPa	等效宽 0.6L/cm	等效长/cm
0	100	0.700	15.684	22.772
30	130	0.830	16.420	23.842
50	150	0.911	16.837	24.446
80	180	1.026	17.383	25.239
100	200	1.098	17.706	25.708
150	250	1.270	18.411	26.732
200	300	1.430	19.008	27.599

### 1.2 数值模拟计算

采用典型的半刚性基层沥青路面结构形式建立有限元模型, 路面结构参数见表 2。为方便建立模型, 加载区域采用矩形。

初步计算发现, 模型尺寸只要大于 3 倍双轮加载间距即可满足精度要求。综合考虑计算时间和结果精度, 确定模型尺寸为  $6 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 。

根据沥青路面的受力特点, 土基底面完全固定, 道路横向 2 个面约束道路横向位移, 行车方向 2 个面约束行车方向位移。

表 2 路面结构参数

结构层	材料	厚度/cm	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
上面层	SBS—AC—13	4	2 500	1 400	0.35
中面层	SBS—AC—20	6	2 400	1 200	0.35
下面层	AC—25	8	2 400	1 000	0.35
基层	CTB 5%	36	2 300	1 500	0.25
底基层	CTB 4%	20	2 300	1 500	0.25
垫层	GM	20	2 100	225	0.35
土基	SG	—	1 800	40	0.35

2 重载对沥青路面使用性能的影响

2.1 对弯沉的影响

沥青路面最大弯沉随轴重的变化见图 2。

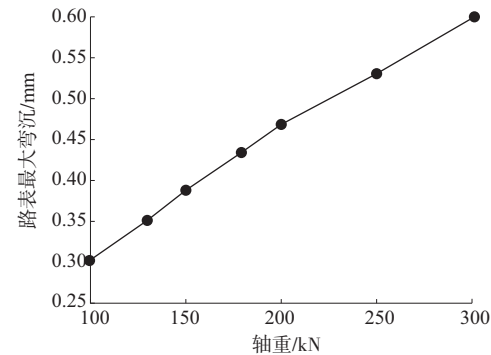


图 2 沥青路面最大弯沉随轴重的变化

由图 2 可知:沥青路面弯沉最大值随轴重的增加近似呈线性增长,标准轴重 100 kN 作用时的弯沉为 0.294 mm,轴重为 300 kN 时弯沉为 0.600 mm,约为 100 kN 的 2 倍。重载作用下沥青路面产生的弯沉远大于标准轴载作用下的弯沉值,重载作用要求路面结构具有极强的结构承载能力;弯沉越大,路面结构产生的弯拉应力越大,在重载长期反复作用下易产生疲劳开裂、坑槽、沉陷等病害。

2.2 对永久变形的影响

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》附录 B 中 B.3 节,按压应力对各级轴重作用下沥青混合料层的永久变形量进行验算。其中标准轴重作用下沥青混合料层永久变形量见式(3),满足永久变形量验算标准(沥青混合料层容许永久变形量为 15 mm)。

$$R_a = \sum_{i=1}^n R_{ai} = 2.096 + 3.718 + 3.521 + 2.476 + 1.463 + 1.704 = 14.978 \text{ mm} \quad (3)$$

假设结构的分层厚度不变,各分层的永久变形量不变,而轴重不同,各分层顶面的压应力不同,反推轴载累计作用次数,结果见图 3。

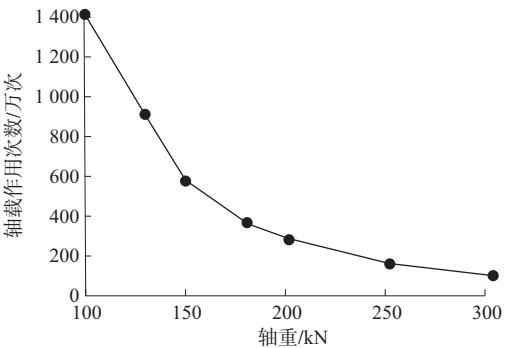


图 3 不同轴重下产生相同永久变形量所需轴载作用次数

由图 3 可知:随着轴重的增加,产生相同永久变形量所需轴载作用次数呈幂函数形式递减。轴重从 100 kN 增加到 150 kN 时,作用次数减小速率较大,随着轴重的增加,变化速率减缓。100 kN 的轴重需作用 1 384 万次才能达到容许拉应变,轴重为 150 kN 时需作用 563.158 万次,是标准轴载作用时的 0.407 倍;轴重为 300 kN 时需作用 102.517 万次,是 150 kN 轴载作用时的 0.182 倍、标准轴载作用时的 0.074 倍。

2.3 对剪应力的影响

根据以往研究,沥青路面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。对沥青路面在竖向荷载作用下产生的最大剪应力进行计算,结果见图 4。

由图 4 可知:最大剪应力出现在车轮荷载作用位置的中面层。因此,取荷载作用中心位置沿竖向路径分析最大剪应力随轴重的变化,结果见图 5。

由图 5 可知:轴重为 100 kN 时,最大剪应力为 0.217 MPa;轴重为 300 kN 时,最大剪应力为 0.443

MPa, 约为 100 kN 时的 2 倍。最大剪应力随着轴重的增加基本呈线性增长。

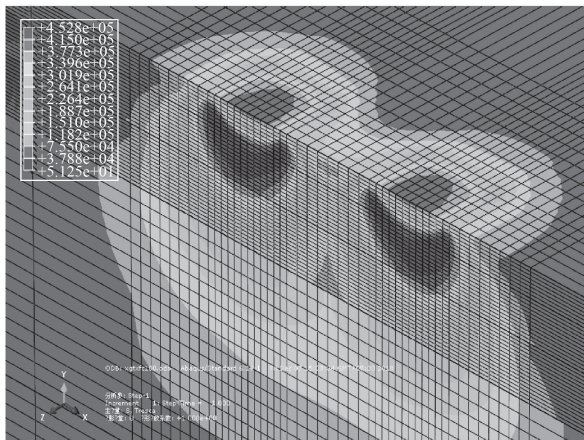


图4 荷载作用中心应力云图(单位:Pa)

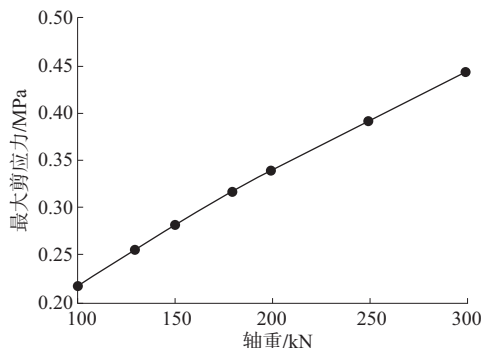


图5 最大剪应力随轴重的变化

## 2.4 沥青混合料层疲劳开裂验算

根据《公路沥青路面设计规范》附录 B 中的 B.1 节,对各级轴重作用下沥青混合料层的疲劳开裂寿命进行验算,结果见图 6。

由图 6 可知:随着轴重和接地压强的增大,沥青混合料层的疲劳寿命不再呈直线增大,而是呈对数函数形式急剧减小。全部为标准轴载作用时,沥青混合料层的疲劳寿命为 3 809.81 万次;以 300 kN 的轴载作用在路面结构上时,沥青混合料层的疲劳寿命为 223.33 万次,是标准轴载作用下的 0.06 倍,重载作用对沥青混合料层疲劳寿命的影响巨大。

沿行车方向的拉应变在中面层底荷载作用区域中心位置达到最大值;随着轴重的增加,最大拉应变线性增加。根据《公路沥青路面设计规范》中公式 B.1.1-1,沥青层层底拉应变直接影响路面的疲劳寿命,轴重越大,拉应变越大,沥青路面的疲劳寿命越小。

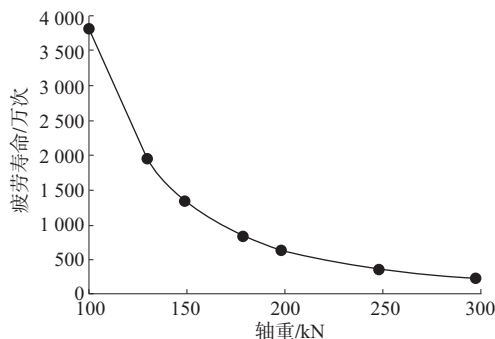


图6 沥青混合料层疲劳寿命随轴重的变化

## 2.5 无机结合料层疲劳开裂验算

根据《公路沥青路面设计规范》附录 B 中的 B.2 节,对各级轴重作用下无机结合料稳定层的疲劳开裂寿命进行验算,结果见图 7。

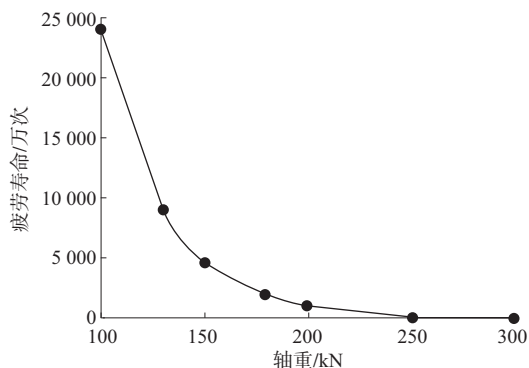


图7 无机结合料层疲劳寿命随轴重的变化

由图 7 可知:随着轴重和接地压强的增大,无机结合料层的疲劳寿命不再呈直线增大,而是呈对数函数形式急剧减小。全部为标准轴载作用时,无机结合料层的疲劳寿命为 23 972.75 万次;以 300 kN 的轴载作用在路面结构上时,无机结合料层的疲劳寿命为 99.35 万次,是标准轴载作用下的 0.004 倍,重载作用对无机结合料层疲劳寿命的影响巨大。

无机结合料稳定层层底沿行车方向的拉应力在底基层层底的轮距中心位置达到最大值,且拉应力从该位置向四周扩散;随着轴重的增加,底基层层底拉应力增大,导致基层和底基层拉裂,裂缝向上传递使沥青路面产生反射裂缝,重载作用使无机结合料层的疲劳寿命迅速减小。

## 2.6 路基顶面压应变及数值验算

根据《公路沥青路面设计规范》附录 B 中的 B.4 节,对路基顶面容许压应变进行验算,结果见图 8。

由图 8 可知:随着轴重的增加,路基顶面产生容许压应变所需作用次数呈幂函数形式减小。轴重从

100 kN 增加到 150 kN 时,作用次数减小速率较大,随着轴重的增加,变化速率减缓。100 kN 标准轴重需作用 1 384 万次才能达到容许压应变,轴重为 150 kN 时需作用 182.255 万次,是标准轴载作用时的 0.132 倍;轴重为 300 kN 时需作用 5.695 万次,是 150 kN 轴载作用时的 0.03 倍、标准轴载作用时的 0.000 4 倍。

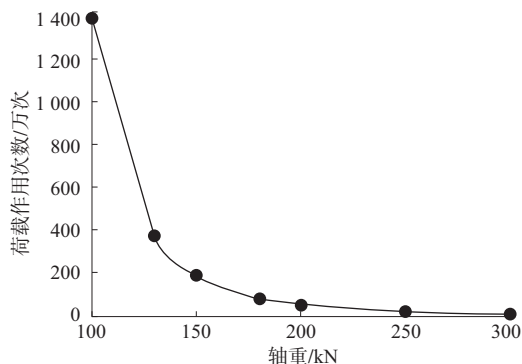


图8 不同轴重下路基顶面产生容许压应变所需作用次数

路基顶面压应变沿过轮距中心的竖向对称轴呈对称分布,在轮距中心达到最大值,轴重对最大值的影响极为显著;300 kN 荷载时压应变是 100 kN 荷载时的 1.88 倍,在重载作用下,土基顶面压应变在很小作用次数内就能达到容许压应变,从而导致路基沉陷。

### 3 结论

(1) 路表最大弯沉随轴重增大呈线性增长。

(2) 随着轴重的增加,产生相同永久变形量所需轴载作用次数呈幂函数形式递减,最大剪应力基本呈线性增长。

(3) 随着轴重和接地压强的增大,沥青混合料层、无机结合料层的疲劳寿命不再呈直线增大,而是呈对数函数形式急剧减小。

(4) 在重载作用下,土基顶面压应变在很小作用次数内就能达到容许压应变,从而导致路基沉陷。

### 参考文献:

- [1] 钱国平,郭忠印,朱云升,等.重载交通条件下沥青路面损害类型的调查研究[J].中外公路,2004,24(5).
- [2] 申向英.对我国公路沥青混凝土路面设计现状的研究探讨[J].建筑工程技术与设计,2015(19).
- [3] 彭伟.重载交通下沥青混凝土路面结构力学性能分析[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [4] 丁小军,陈团结.对我国公路沥青混凝土路面设计现状的思考[J].公路,2010(3).
- [5] 戴震.沥青路面结构受力机理分析[D].南京:东南大学,2004.
- [6] 李小虎.重载交通对沥青路面使用寿命影响研究[D].西安:长安大学,2005.
- [7] 肖丽霞.重载交通沥青路面力学响应分析及车辙预测[D].郑州:郑州大学,2011.
- [8] 袁耀波.基于不同基层弹性模量的沥青路面加铺厚度设计案例分析[J].公路与汽运,2017(4).
- [9] 邓荣彦.路基回弹模量衰减对路面结构性能的影响研究[J].公路与汽运,2015(4).
- [10] 马莉.沥青混凝土路面结构层弹性模量对层间最大剪应力影响规律研究[J].公路,2014(12).
- [11] 金霞.重载作用下沥青路面力学响应的三维有限元分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
- [12] 钱国平,朱云升,徐建明.重载交通状况及其沥青路面损害模式的调查研究[J].交通科技,2004(5).
- [13] 胡小弟,孙立军,刘兆金.沥青路面非均布荷载下层间接触条件不同时力学响应的三维有限元分析[J].公路交通科技,2003,20(3).
- [14] 马建国,滑宇飞,王圣棋.内蒙古重载交通沥青路面结构力学响应分析[J].内蒙古工业大学学报:自然科学版,2019,39(2).

收稿日期:2019-08-06

(上接第 29 页)

研究[J].铁道学报,1999(2).

[8] 芦畅,陈圣韬,汪睿,等.中国航空货运景气指数研究与实践[J].中国市场,2018(29).

[9] 梁纪,刘荣昌,李振江,等.中国高速公路与全社会公路运输量关系研究[J].公路与汽运,2016(6).

[10] 郭茜.物流景气指标分类与景气指数编制实证研究[A].北京市第十六次统计科学研讨会获奖论文集[C].2011.

[11] 曾祥龙.基于景气指数的铁路运输市场评价与相关问题研究[D].北京:北京交通大学,2017.

[12] 赵福杰.建立综合交通运输市场景气指数体系的探讨[D].大连:大连海事大学,2013.

[13] 解钰茜,吴昊,崔丹,等.基于景气指数法的环境承载力预警[J].中国环境科学,2019,39(1).

收稿日期:2019-10-10