

文章编号:1005-0523(2014)03-0018-05

纵坡弯道桥面沥青铺装结构剪应力分析

祁文洋¹,孔晨光²,于增义³(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.山东高速股份有限公司,山东 济南 250000;
3.山东华鉴路桥技术有限公司,山东 济南 250000)

摘要:依据纵坡弯道车辆荷载作用特性,建立纵坡弯道桥面铺装结构三维有限元模型,分析车辆载重、行驶速度、弯道半径、纵坡坡度、沥青铺装层厚度与模量对水平剪应力的影响。结果表明:设计时避免最小半径极限值与纵坡坡度最大值同时出现,适当增大沥青铺装上层模量、铺装层总厚度、减小沥青铺装下层模量,并严格控制纵坡弯道上车速及车辆载重,可减少沥青铺装层发生推移病害的可能性。

关键词:道路工程;纵坡弯道;桥面铺装结构;沥青铺装层;推移;有限元;水平剪应力

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

工程实践发现,城市立交匝道桥面铺装结构水平推移现象较为严重。推移是桥面沥青铺装结构夏季较容易发生的一种病害,其产生主要是由于沥青混合料的抗剪强度不足而产生的塑性流动,或者是由于沥青结构层与混凝土结构层间粘结力不足而产生的滑移^[1-5]。城市匝道一般设计为纵坡弯道形式,研究表明离心力的存在和现行设计方法的不足是导致桥面弯道薄弱环节的原因^[6],然而以往大量研究将车辙和推移视为同种成因^[7],而推移与车辙由于病害表现形式的不同,其力学成因并不一致。

1 纵坡弯道荷载作用特征分析

1.1 车辆荷载作用方式

在纵坡弯道上,车辆施加给桥面的作用力分别为法向力 W 、纵向水平力 p 及横向水平力 f 。由于桥面纵向倾角 α 、横向倾角 β 的取值较小,可认为法向力 W 等于汽车的重力 G ^[8]。纵向水平力 p 等于车辆行驶阻力。根据车辆动力学原理,车辆行驶阻力由4部分阻力组成:滚动阻力 F_r 、空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 、惯性阻力 F_j ,则 p 值可按式(1)计算。横向水平力 f 为车辆通过弯道时所承受的离心力及重力分力的合力,可按式(2)计算。

$$p = W\mu + Gi_w + \frac{KA v^2}{21.15} + \delta m a^2 \quad (1)$$

$$f = \left(\frac{v^2}{127R} - i_h \right) G \quad (2)$$

式中: μ 为滚动阻力系数; i_w 为坡度,%; K 为空气阻力系数; A 为汽车迎风面积, m^2 ; v 为车速, $km \cdot h^{-1}$; δ 为汽车旋转质量换算系数, >1 ; m 为汽车总质量, kg ; a 为汽车加速度, $m \cdot s^{-2}$; G 为车辆自重力, N ; v 为车速, $km \cdot h^{-1}$; R 为弯道几何半径, m ; i_h 为弯道超高,%。

收稿日期:2014-04-05

作者简介:祁文洋(1985—),男,博士研究生,研究方向为路面结构设计与道路建筑材料。

1.2 轮载作用方式

由于离心力的存在,车辆将受到扭矩的作用,从而使轮轴内、外侧轮胎的承载力不一致^[9]。以单轴双轮轴载为例,由于承载力的不同,其施加给桥面的法向力、纵向水平力、横向水平力也不同,如图1所示。

在图1中, w_1, f_1, p_1 分别为内侧车轮施加给桥面的法向力、横向水平力、纵向水平力; w_0, f_0, p_0 分别为外侧车轮施加给桥面的法向力、横向水平力、纵向水平力。其中, f_0, f_1 为 $1/2f$;法向力 w_1, w_0 可由式(3)(4)计算。

$$W_1 = \left[\frac{B}{2} \cos \beta + H \sin \beta + \frac{v^2 (B \sin \frac{\beta}{2} - H \cos \beta)}{127R} \right] \frac{G}{B} \quad (3)$$

$$W_0 = \left[\frac{B}{2} \cos \beta + H \sin \beta + \frac{v^2 (B \sin \frac{\beta}{2} + H \cos \beta)}{127R} \right] \frac{G}{B} \quad (4)$$

式中: H 为车辆质心高度,m; B 为车辆轮距,m; v 为车速, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; R 为弯道半径,m。

由于桥面纵向倾角 α 较小,所以可假定轴载的坡度阻力、空气阻力、惯性阻力平均分配于内外两侧轮组上,则纵向水平力 p_1, p_2 可按式(5)(6)计算。

$$p_1 = W_1 \mu + \frac{1}{2} (G i_w + \frac{K A v^2}{21.15} + \delta m a^2) \quad (5)$$

$$p_0 = W_0 \mu + \frac{1}{2} (G i_w + \frac{K A v^2}{21.15} + \delta m a^2) \quad (6)$$

式中: G 为单轴轴载,kN。

2 有限元模型建立

2.1 荷载模型

钱国平以斜交和子午线纵向花纹轮胎为研究主体,给出了轮胎-路面三维应力的接触模型^[10],其具体分析模型与计算方法为:将轮胎与桥面的接触面视为矩形,且在宽度方向上将接触面的整个面积分为3个区域,分别为两边20%宽度范围的边缘区和中间60%宽度范围的中心区。矩形接触面尺寸及应力可由式(7)~(9)计算得到。

$$q_{zc} = 190.23 + 0.438 p_i + 0.864 P_z \quad (7)$$

$$q_{ze} = 185.205 + 0.046 p_i + 10.789 P_z \quad (8)$$

$$l = \frac{5 P_z}{4 W (941.1 + 1.406 p_i + 24.17 P_z)} \quad (9)$$

式中: q_{zc} 为中心区平均竖向压应力,kPa; q_{ze} 为边缘区平均竖向压应力,kPa; p_i 为轮胎内压力,kPa; P_z 为作用于轮胎的竖向荷载,kN; l 表示接地面矩形长度的一半,m; w 表示矩形宽度的一半,等于轮胎胎面宽度一半,m。

本文中计算代表车型按照现行规范规定的标准车型进行计算,即黄河JN-150型汽车,子午线轮胎宽为26.3 cm,双轮中心间距为34.6 cm,轮胎内压为700 kPa。计算时仅考虑外侧车轮,具体的车辆参数及不同装载率对应后轴轴重见表1。

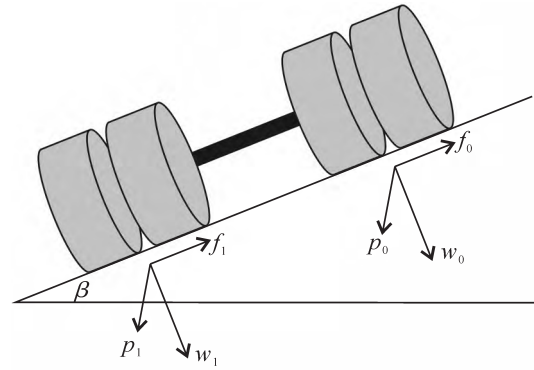


图1 轮载作用力示意图

Fig.1 Schematic diagram of wheel load

表1 车辆计算参数及轴重

Tab.1 Parameters of vehicle and axle load

车辆参数				后轴轴重			
K	A/m^2	H/m	B/m	μ	φ	装载 100%	装载 200%
0.8	5	1.6	1.8	0.02	0.6	100 kN	170 kN

2.2 几何模型及材料参数

桥面铺装结构可假定为4层弹性体系,即:沥青铺装上层、沥青铺装下层、素混凝土层和桥面板^[11-12]。设行车方向为 X 向,与其垂直的方向为 Y 向,桥面铺装结构结构模型 X 、 Y 方向的尺寸取3 m,采用八节点立方体单元。模型边界条件为:底面在3个坐标轴方向位移为零;模型前后两个侧面 X 向位移为零;模型左右两个侧面 Y 向位移为零。模型计算中所需的材料参数如表2所示^[13]。

表2 桥面铺装结构材料参数

Tab.2 Parameters of pavement structure

桥面铺装结构	厚度/cm	模量/MPa	泊松比
沥青铺装上层	4	1 200	0.35
沥青铺装下层	6	1 200	0.35
素混凝土找平层	2	22 000	0.18
钢筋混凝土桥面	3	36 000	0.18

纵坡弯道设计车速取 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,根据《公路路线设计规范》^[14](JTG-D20-2006)中规定的几何尺寸取值范围,模型中纵坡弯道的几何尺寸取值如表3所示。

表3 纵坡弯道几何尺寸

Tab.3 Geometric size of longitudinal slope curve

纵坡坡度 ¹ /%	弯道半径 ² /m	超高/%
2/4/6	125/200/275	4

注:1.设计车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,最大纵坡坡度为6%。

2.设计车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,最小弯道半径极限值为125 m,为条件受限时可采用的值;最小弯道半径一般值为200 m,为一般情况下可采用的值。

3 有限元计算结果

3.1 车辆装载率、行驶速度对沥青铺装层水平剪应力影响分析

纵坡坡度取值6%,弯道半径取值200 m,通过有限元模型计算得到不同车速、装载率时沥青铺装层内水平剪应力的包络图见图2。由图2可以看出,车速 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、装载率由100%增加到200%时,最大水平剪应力值位置下移,位于沥青铺装层深度2 cm处,最大水平剪应力值变化不大,而沥青铺装层表面水平剪应力值有所减小;车速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,装载率100%与车速 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,装载率200%工况相比,沥青铺装层深度0~2 cm范围内水平剪应力值较大,而2~10 cm范围内差别不大;车速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,装载率200%时,沥青铺装层内水平剪应力值最大。

3.2 弯道半径、纵坡坡度对沥青铺装层水平剪应力影响分析

车速取值 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,装载率选取100%,通过有限元计算模型计算得到不同弯道半径、坡度时沥青铺装层内的 τ 的包络图见图3。由图3可知,沥青铺装层内不同深度处水平剪应力值随着纵坡坡度、弯道半径的增加而增大,其中沥青铺装层表面水平剪应力值增加较为明显。坡度为6%,半径为125 m时,沥青铺装层

表面水平剪应力最大,其值为117 kPa。坡度为6%,半径为200 m,车速为80 km·h⁻¹时,沥青铺装层表面水平剪应力最大,其值为120 km·h⁻¹。从推移损坏的角度出发可以认为,以上两种工况对桥面铺装结构的损坏程度相当,即同时选取最大坡度、最小半径极限值时,车辆按设计车速行驶相当于“超速行驶”。

3.3 沥青铺装层厚度、模量对桥面铺装结构水平剪应力影响分析

纵坡坡度取值6%,弯道半径取值200 m,车速取值60 km·h⁻¹,装载率选取100%,通过有限元模型计算得到不同厚度、模量沥青铺装层内的 τ 的包络图,分别见图4、图5。由图4、图5可以看出,沥青铺装层深度0~5 cm范围内,水平剪应力基本不受沥青铺装层厚度的影响;沥青铺装层深度5 cm以下不同深度的水平剪应力随沥青铺装层厚度的增加呈减小趋势。沥青铺装层深度0~3 cm范围内,水平剪应力基本不受沥青铺装层模量的影响;沥青铺装层3 cm以下不同深度水平剪应力随沥青铺装上层模量的增加呈减小趋势,而随着沥青铺装下层模量的增加呈增大趋势。

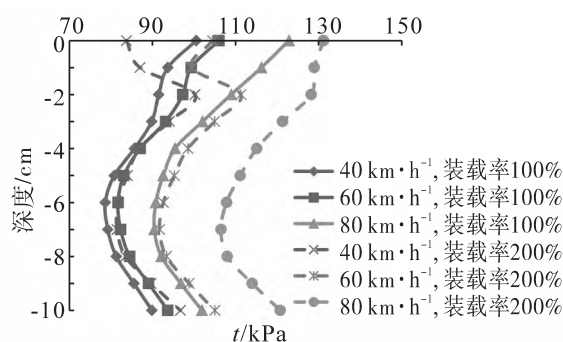


图2 水平剪应力与车速、装载率的关系

Fig.2 Relationship between horizontal shear stress and the vehicle's speed and loading rate

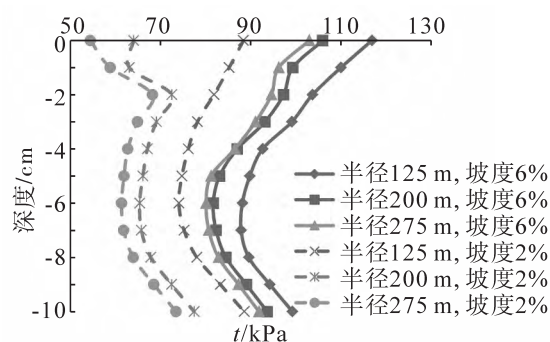


图3 水平剪应力与弯道半径、纵坡坡度的关系

Fig.3 Relationship between horizontal shear stress and curve radius, longitudinal slope degree

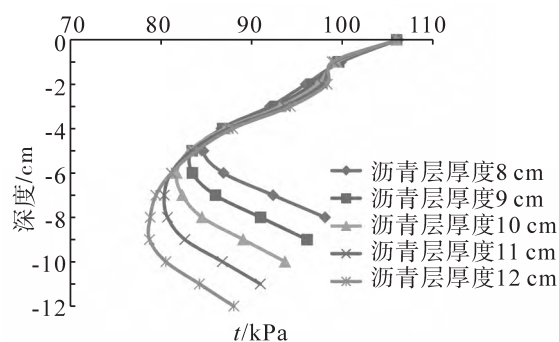


图4 水平剪应力与沥青铺装层厚度的关系

Fig.4 Relationship between horizontal shear stress and thickness of asphalt layer

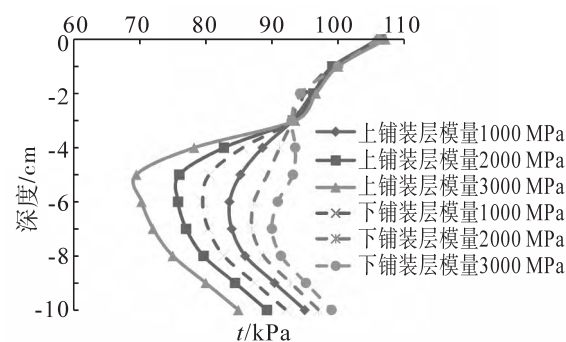


图5 水平剪应力与沥青铺装层模量的关系

Fig.5 Relationship between horizontal shear stress and modulus of asphalt layer

4 结论与建议

通过纵坡弯道桥面沥青铺装结构三维有限元模型的计算与分析,得到结论与建议如下:

1) 减小纵坡坡度、增大弯道半径可减小沥青铺装层内的水平剪应力;高沥青铺装上层模量或增加沥青铺装层厚度可减小沥青铺装层内的水平剪应力,而沥青铺装下层模量增加使得沥青铺装层内水平剪应力增大;车速及车辆装载率增加均可使沥青铺装层内水平剪应力增大。

2) 为减少沥青铺装层发生推移病害的可能性,在进行纵坡弯道几何设计时,应避免最小半径极限值与纵坡坡度最大值的同时出现;在进行沥青铺装层结构设计时,应适当提高沥青铺装上层模量或增大沥青铺装层厚度,且沥青铺装下层应选择模量较小的材料;应严格纵坡弯道上行车速度及车辆载重。

3) 需进一步解决的问题:针对高温条件下沥青铺装层的模量进行实测,分析高温条件对沥青铺装层模量的不利影响,并对有限元模型材料参数的取值进行优化,以提升有限元模型计算与分析的有效性。

参考文献:

- [1] 李娜.陡坡路段抗推移沥青混合料技术研究[D].西安:长安大学,2007.
- [2] 徐伟,李智,张肖宁.混凝土桥面铺装粘结层体系力学性能试验研究[J].哈尔滨建筑大学学报, 2002,35(4): 126~130.
- [3] 周杰,陈太泉,杨朋,等.水泥混凝土桥沥青铺装层力学功能分工研究[J].武汉理工大学学报,2007,29(9): 24~26.
- [4] 王胜,叶奋,武金婷,等.钢桥面环氧沥青防水粘结层耐久性影响分析[J].华东交通大学学报,2012,29(1): 39~42.
- [5] 于江,周灵,叶奋,等.非线性模型在钢桥面铺装层温度场计算中的应用[J].华东交通大学学报,2012,29(2): 47~50.
- [6] 曹阳.陡坡急弯路段沥青桥面铺装结构力学响应及其设计方法的研究[D].重庆:重庆交通大学,2010.
- [7] 贾晓阳.混凝土桥面沥青铺装结构设计指标研究[D].上海:同济大学,2012.
- [8] 孙家骊.道路勘测设计[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [9] 肖兴强,张立宏,艾长发,等.弯道超高路段沥青路面的力学响应分析[J].重庆交通大学学报,2008,27(1),53~56.
- [10] 钱国平.重载条件下沥青路面结构复杂受力特征及力学响应研究[D].上海:同济大学,2004.
- [11] 张占军,胡长顺.设防水层的混凝土桥桥面铺装结构剪应力计算与分析[J].西安公路交通大学学报,2001,21(2),14~17.
- [12] 徐伟,郑国梁,张肖宁.混凝土桥面沥青铺装层受力敏感性分析[J].公路交通科技,2004, 21(1): 8~11.
- [13] 胡晓,贾璐,胡小弟,等.混凝土桥面沥青铺装结构的剪切分析[J].公路工程,2007, 32(4): 136~141.
- [14] JTG D20-2006 公路路线设计规范[S].北京:人民交通出版社,2000.

Shear Stress Analysis of Bridge Deck Asphalt Pavement for Longitudinal Slope Curve

Qi Wenyang¹, Kong Chenguang², Yu Zengyi³

(1.Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2.Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan 250000, China; 3.Shandong Huajian Bridge Technology Co., LTD., Jinan 250000, China)

Abstract: Based on the properties of vehicle loads on longitudinal slope and curved sections, this paper establishes the 3D finite element model for the bridge deck pavement, analyzing effects of the vehicle loads, running speed, the radius of curved sections, longitudinal slope degree, the thickness and modulus of asphalt layer on horizontal shear stress. Results show that in order to avoid the appearance of the minimum radius and the maximum longitudinal slope degree at the same time, it is advisable to increase modulus of upper asphalt layer and the total thickness of asphalt layer, decrease sub-layer modulus, and limit the vehicle speed and load at the curved sections so that translation diseases of asphalt layer can be reduced.

Key words: road engineering; curved sections; bridge deck pavement; asphalt layer; translation diseases; finite element method; horizontal shear stress