

文章编号:1671-8879(2008)03-0040-04

桥面混凝土裂缝处防水层抗拉分析

吴 浩^{1,2}

(1. 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;

2. 河南省公路管理局,河南 郑州 450052)

摘 要:为充分了解桥面防水层的层间拉应力的变化规律,研究桥面混凝土裂缝处防水层的抗拉性能,利用有限元法对混凝土桥面铺装结构建模,分析了在行车荷载作用下,桥面各铺装层参数对桥面防水层层间法向拉应力的影响规律,并针对桥面水泥混凝土调平层裂缝处的防水层,建立了防水层张力计算模型。计算结果表明:沥青混凝土面层与水泥混凝土调平层的模量和厚度、防水层厚度等参数的变化对层间法向拉应力影响很小;防水层模量是影响层间法向拉应力的主要因素,当防水层模量为 10~50 MPa 时,对层间法向拉应力的影响最大,防水层模量为 50~300 MPa 时影响较大,防水层模量为 300~1 500 MPa 时影响基本稳定。

关键词:道路工程;防水层;拉应力;延伸率;模量

中图分类号:U443.33; U416.216 **文献标志码:**A

Tensile stress of waterproofing layer under concrete bridge deck pavement with cracks

WU Hao^{1,2}

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Henan Province

Administration of Highway, Zhengzhou 450052, Henan, China)

Abstract: In order to master the direct tensile stress change rules of waterproofing layer under the asphalt pavement with cracks when the deck pavement bears the traffic loads, this paper analyzes the influences of the bridge deck pavement parameters on the direct tensile stress of waterproofing layer using the finite element method, and puts forward the model of calculating the tensile stress of waterproofing layer considering the deformation of the waterproofing layer on the cracks of concrete leveling layer under the traffic loads. The results show that: the influences of the thickness and modulus of asphalt pavement and concrete leveling pavement, and the thickness of the waterproofing layer on the direct tensile stress can be ignored, the modulus of waterproofing layer is the main influencing factor; when the waterproofing layer modulus is from 10 MPa to 50 MPa, the influence of the modulus on the tensile stress is the biggest; when the modulus is from 50 MPa to 300 MPa, the influence is bigger; when the modulus is from 300 MPa to 1 500 MPa, the direct tensile stress becomes stable. 3 tabs, 9 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; waterproofing layer; tensile stress; ratio of elongation; modulus

收稿日期:2007-05-20

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200531800009)

作者简介:吴 浩(1972-),男,河南郑州人,河南省公路管理局高级工程师,长安大学博士研究生, E-mail: fjwu36@live.cn

0 引言

桥面防水层不仅要具有防水功能,而且与沥青混凝土铺装层、桥面板间应具有可靠的抗剪性能^[1-5]。文献[1]分析了防水层的厚度、模量、泊松比、沥青混凝土铺装层厚度和模量等参数对结构层剪应力的影响,有一定的理论价值和实践指导意义。根据文献[2],可以计算出防水材料在负弯矩区产生最大弯曲应力时所要求的拉伸强度。调查表明,桥面沥青混凝土铺装层在桥梁负弯矩区常出现裂缝损坏,而面层剥落往往在裂缝处表现得更加明显;在自身应力和荷载作用下,桥面板混凝土通常也会产生裂缝。为此,本文利用有限元法进行实体建模,深入研究沥青面层开裂处防水层在行车荷载作用下的层间法向拉应力变化规律,针对桥面水泥混凝土裂缝处的防水层在垂直荷载作用下的变形情况,建立防水层张力计算模型,以便计算在此工况下防水层须具备的最小延伸率和拉伸强度^[6-8]。

1 桥面开裂处防水层法向拉应力

1.1 基本假设

- ①桥梁梁体和水泥混凝土调平层为一刚性体;
- ②各层材料具有线弹性性质,用弹性模量、泊松比表征;
- ③桥面铺装层间完全连续接触;
- ④沥青混凝土铺装层处于开裂状态;
- ⑤可以忽略桥梁震动对计算

的影响。

1.2 计算模型、荷载最不利位置及基本参数

采用 ANSYS 有限元软件进行空间实体建模,用空间 8 节点单元模拟。边界条件为桥面板底面固定约束,四周为侧向约束,面层自由裂缝对应一侧有侧向约束。荷载为 BZZ-100,单元荷载为 25 kN,标准荷载圆半径为 10.65 cm。

基本计算参数见表 1。当荷载位置在裂缝边缘外,水泥混凝土模型为 8 m×4 m×0.35 m 时,拉应力均收敛(表 2),故基本模型为 8 m×4 m×0.35 m。沥青面层和桥面板的网格密度为 20 cm×20 cm×10 cm 和 20 cm×20 cm×25 cm。确定模型的基本尺寸后,计算结果(表 3)表明,荷载圆距离裂缝 20 cm 处是荷载最不利位置,最大法向拉应力出现在裂缝边缘处。

1.3 沥青面层和桥面水泥混凝土模量的影响

图 1 计算结果显示,沥青混凝土模量(E_a)从 800 MPa 增加到 8 000 MPa,防水层与沥青铺装层之间的法向拉应力(以下简称 σ_u)值最大变化了 1.45%,防水层与桥面板之间的法向拉应力(以下简称 σ_d)值最大变化了 1.27%。由图 2 知,桥面板水泥混凝土模量(E_c)从 30 000 MPa 变化到 150 000 MPa, σ_u 最大变化了 0.07%, σ_d 最大变化了 0.04%。因此,可以忽略沥青混凝土模量和桥面板水泥混凝土模量对层间法向拉应力的影响。

表 1 基本计算参数

参数	沥青混凝土 模量 E_a /MPa	沥青混凝土 泊松比 μ_a	沥青混凝土 厚度 h_a /cm	水泥混凝土 模量 E_c /MPa	水泥混凝土 泊松比 μ_c	桥面板厚度 h_c /cm	防水层模量 E_m /MPa	防水层厚度 h_m /mm
取值	1 500	0.25	5	100 000	0.15	30	150	3

表 2 确定模型尺寸

模型尺寸/m			最大拉应力/MPa	剪应力/MPa
长	宽	高		
12	6	0.35	0.099 118	0.144 80
10	5	0.35	0.099 118	0.144 80
8	4	0.35	0.099 118	0.144 80
8	4	0.45	0.099 122	0.144 73
8	4	0.55	0.099 131	0.144 69

表 3 确定最不利荷载位置

荷载圆距裂缝距离/m	最大拉应力/MPa	剪应力/MPa
0.0	0.099 118	0.144 800
0.2	0.117 270	0.101 423
0.4	0.071 055	0.100 430
0.6	0.068 158	0.100 171
0.8	0.068 372	0.100 112
1.0	0.068 461	0.100 108

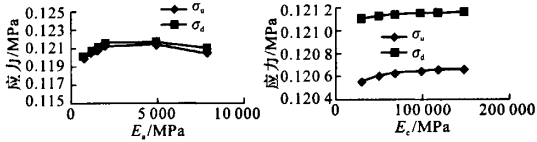


图 1 E_a 对法向拉应力的影响

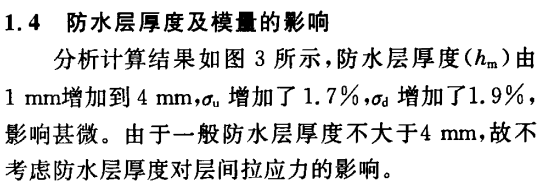
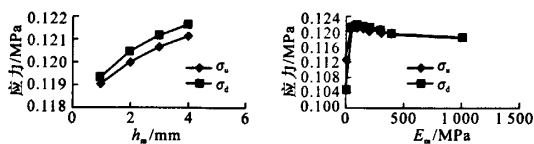
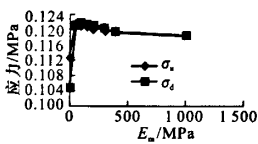


图 2 E_c 对法向拉应力的影响

1.4 防水层厚度及模量的影响

分析计算结果如图 3 所示,防水层厚度(h_m)由 1 mm 增加到 4 mm, σ_u 增加了 1.7%, σ_d 增加了 1.9%,影响甚微。由于一般防水层厚度不大于 4 mm,故不考虑防水层厚度对层间拉应力的影响。

根据拉应力与防水层模量(E_m)的变化规律,可根据 E_m 将图 4 中的曲线划分为 3 个区段,即 10~50 MPa、50~300 MPa、300~1 500 MPa。当 E_m 从 10 MPa 增加到 50 MPa 时,曲线变化速率最大, σ_u 增加了 7.89%, σ_d 增加了 16.15%;当 E_m 从 50 MPa 增

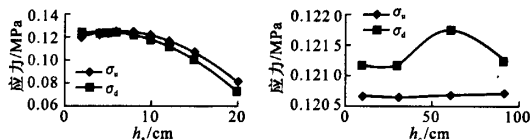
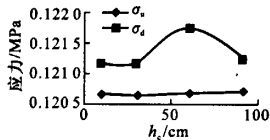
图3 h_m 对法向拉应力的影响图4 E_m 对法向拉应力的影响

加到 300 MPa 时, σ_u 最大变化了 1.71%, σ_d 最大变化了 2.88%, 影响较大; 当 E_m 在 300~1 500 MPa 区间时, 曲线变得更加平稳, 影响基本稳定。因此, 须考虑防水层模量的变化对层间拉应力的影响。

1.5 沥青面层和桥面板水泥混凝土厚度的影响

分析图 5 可知, 沥青混凝土厚度(h_a)由 2 cm 增加到 8 cm 的过程中, σ_u 最大变化了 3.94%, σ_d 最大变化了 1.59%, 影响微小。沥青混凝土厚度由 8 cm 增加到 20 cm 时, σ_u 减小 35.01%, σ_d 减小 39.84%。由于沥青混凝土厚度一般不会大于 10 cm, 故可以不考虑沥青面层厚度的变化对层间拉应力的影响。

由图 6 可知, 桥面板厚度(h_c)在 10~90 cm 之间变化时, σ_u 最大变化了 0.02%; σ_d 最大变化了 0.46%。因此, 可不考虑桥面板厚度的变化对层间拉应力的影响。

图5 h_a 对法向拉应力的影响图6 h_c 对法向拉应力的影响

2 桥面裂缝处防水层受力分析

当防水层受均匀的竖向荷载作用时, 由于桥面混凝土缝隙的存在, 防水层呈现弧形下陷。下陷变形曲线呈圆弧形, 同时因延伸而产生张力(每单位宽度的力, N/m)。如图 7 所示, 张力方向沿圆弧的切线方向。其方程为

$$r^2 = (r-y)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 \quad (1)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{b}{2r}\right) \quad (2)$$

式中: b 为缝隙宽度(m); r 为圆弧半径(m); α 为缝隙宽度对应的 1/2 圆心角(°); y 为圆弧半径与防水层平面的差值(m)。

在平面应变条件下, 防水层所受张力可简化, 如图 8 所示。取缝隙上防水层为隔离体(纵向取单位长度), 则

$$pb = 2T\sin(\alpha) \quad (3)$$

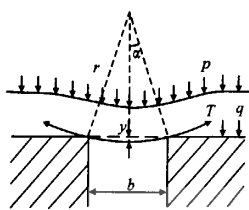


图7 基层裂缝处防水层受力

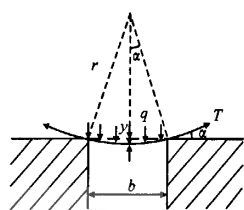


图8 防水层张力计算

$$T = pb/2\sin(\alpha) \quad (4)$$

由式(1)得

$$r = \frac{1}{2} \left(y + \frac{b^2}{4y} \right) \quad (5)$$

将式(6)代入式(2), 可得

$$\sin(\alpha) = \frac{b}{2r} = \frac{1}{(2y/b + b/2y)/2} \quad (6)$$

将式(6)其代入式(4), 可得

$$T = \frac{pb}{2\sin(\alpha)} = \frac{1}{4} pb \left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y} \right) \quad (7)$$

此时, 由于 y, b 与防水层的延伸率有关, 所以

$$f(\epsilon) = \frac{1}{4} \left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y} \right) \quad (8)$$

则

$$T = pb f(\epsilon) \quad (9)$$

式中: T 为缝隙上防水层所受的张力(N/m); p 为作用于防水层上的压力, 标准轴载作用于面层时, 轮压 $q = 0.7$ MPa, 传递到防水层时随路面厚度 h 增大而减小, 为安全起见, 取 $p = q = 0.7$ MPa; ϵ 为防水层的延伸率; $f(\epsilon)$ 为因防水层延伸率而异的计算因子(无量纲)。

根据延伸率 ϵ 的定义, 即有

$$\epsilon = \frac{2\alpha r - b}{b} = \frac{2\alpha r}{b} - 1 \quad (10)$$

则得

$$1 + \epsilon = 2\alpha r/b \quad (11)$$

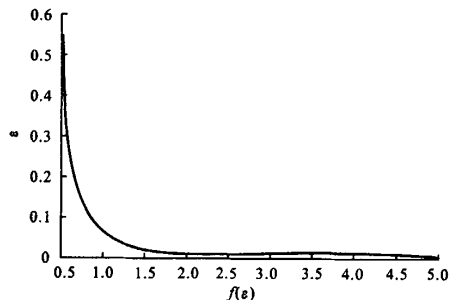
当 $y \leq 0.5b$ 时

$$1 + \epsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y} \right) \arcsin\left(\frac{1}{(2y/b + b/2y)/2}\right) = 2f(\epsilon) \arcsin\left(\frac{1}{2f(\epsilon)}\right) \quad (12)$$

当 $y > 0.5b$ 时

$$1 + \epsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{2y}{b} + \frac{b}{2y} \right) \cdot \left[\pi - \arcsin\left(\frac{1}{(2y/b + b/2y)/2}\right) \right] = 2f(\epsilon) \left(\pi - \arcsin\left(\frac{1}{2f(\epsilon)}\right) \right) \quad (13)$$

由式(12)、式(13)可知, $f(\epsilon)$ 随 ϵ 呈一定规律变化, 见图 9。一般情况下多为前一种情形, 即式(12)。考虑到计算模型的假设条件、荷载重复性、应

图9 $f(\epsilon)$ 随 ϵ 变化的曲线

力集中和其他自然因素的影响,将式(9)乘以安全系数 K_s ,可得

$$T = K_s p b f(\epsilon) \quad (14)$$

K_s 一般取为 3.0。

混凝土内的裂缝一般不超过 2 mm,对于延伸率为 30% 的防水材料,利用式(14)可以计算出由于裂缝而导致的张力 $T \approx 2.1 \times 10^3$ (N/m),换算为拉伸强度为 105 N/cm²。

从上述公式分析可得,对延伸率低的防水层,要求有高的抗拉能力,但并不是防水层的抗拉强度高就能防裂。在基层裂缝宽度一定时,变形能力越大的防水层则适应能力越强。

3 结 语

(1) 沥青混凝土面层的模量和厚度、水泥混凝土调平层的模量和厚度、防水层厚度等参数的变化对沥青面层裂缝处的层间法向拉应力影响很小。层间法向拉应力主要受防水层模量大小的影响,防水层模量为 10~50 MPa 时,对层间法向拉应力的影响最大;防水层模量为 50~300 MPa 时影响较大;防水层模量为 300~1 500 MPa 时影响基本稳定。

(2) 针对防水层在桥面板裂缝处受竖向荷载作用的变形情况,建立了防水层张力的计算模型。利用该模型,可以有效地计算出在桥面水泥混凝土一定宽度的裂缝处,防水层必须具备的最小延伸率和拉伸强度。

(3) 对延伸率较低的防水层,要求具有较高的抗拉能力,但并非防水层的抗拉强度越高,防裂效果就越好;在桥面裂缝宽度一定时,变形能力越大的防水层适应能力就越强。

参考文献:

References:

[1] 张占军,王虎,胡长顺,等.水泥混凝土桥面沥青铺

装及防水层荷载弯曲应力分析[J].中国公路学报,2004,17(4):37-40.

ZHANG Zhan-jun, WANG Hu, HU Chang-shun, et al. Analysis of the load bending stress of concrete bridge decks with asphalt pavement and waterproofing layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004,17(4):37-40.

[2] 王笑风,胡仁东,张占军,等.混凝土桥面防水层直剪试验[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(4):30-34.

WANG Xiao-feng, HU Ren-dong, ZHANG Zhan-jun, et al. Shear test on concrete bridge decks with waterproofing layer[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006,26(4):30-34.

[3] 张占军,周庆华,胡长顺,等.桥面防水层 90°剥离仪的开发及实验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(5):35-39.

ZHANG Zhan-jun, ZHOU Qing-hua, HU Chang-shun, et al. Testing and developing of 90° peel apparatus for concrete bridge deck waterproofing layer[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(5):35-39.

[4] 张占军.混凝土桥桥面防水系统性能及设计方法研究[D].西安:长安大学,2004.

[5] 陈拴发,王秉纲.高性能混凝土应力腐蚀评价指标[J].交通运输工程学报,2005,5(1):6-10.

CHEN Shuan-fa, WANG Bing-gang. Stress-corrosion-evaluation indices of high-property-concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5 (1): 6-10.

[6] 马磊,莫石秀,王秉纲.基于剪切性能的级配碎石关键筛孔合理范围确定[J].交通运输工程学报,2005,5(4):27-31.

MA Biao, MO Shi-xiu, WANG Bing-gang. Rational range determination of key sieve pores for graded crushed stone based on shear performance[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(4):27-31.

[7] Rasmus W, John F O, Henrik S, et al. Analysis of an orthotropic deck stiffened with a cement-based overlay[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12 (3):350-363.

[8] 高英,黄晓明,许涛.水泥混凝土桥梁沥青混凝土铺装层的疲劳性能[J].交通运输工程学报,2006,6(1):39-43.

GAO Ying, HUANG Xiao ming, XU Tao. Fatigue characteristic of asphalt concrete pavement on cement concrete bridge deck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(1):39-43.