

旧水泥路面沥青加铺层间防裂抗拉强度指标研究

袁玉卿¹, 刘凤利¹, 王选仓²

(1. 河南大学 土木建筑学院,河南 开封 475004;2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要: 为了研究旧水泥路面沥青加铺层间防裂抗拉强度指标,基于 APP 油毡层间防裂建立模型,进行了力学分析、理论推导、数值模拟,推导出了层间抗拉强度的实用计算式,推荐了强度指标值. 结果表明: 在小变形的前提下,挠度值与缝宽度、延伸率成正比;防裂夹层所受到的拉力,与缝宽度、路面压力成正比,与延伸率成反比;防裂夹层的拉伸模量在 1 000 MPa 时经济技术效果最好,最大主应力、等效应力及最大剪应力分别为 0.59 MPa,1.02 MPa,0.51 MPa. 考虑油毡的通用试验方法及抗拉强度的表示方法,油毡的抗拉强度应不小于 300 N/50 mm.

关键词: 道路工程;层间抗裂;加铺层;旧水泥路面;抗拉强度;APP 油毡

中图分类号: U416.2 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.007

0 引言

旧水泥路面加铺沥青层,设置层间防裂层能控制和延缓反射裂缝向上传递. 苗英豪等^[1]分析了土工织物内应力应变;李善强^[2]、王选仓^[3]等研究表明 APP 油毡抗裂性能良好;朱宁^[4]、凌天清^[5]等研究了土工材料及应力吸收层防裂;袁明等^[6]分析了层间剪应力及敏感性;李侠^[7]研究了温度应力和耦合应力;王小侠^[8]、李祖仲等^[9]研究了应力吸收层低温抗裂性能;袁玉卿等^[10]研究了最不利点位受力时层间用 APP 油毡防裂;周燕^[11]、尚同羊^[12]等分别探讨了应力吸收层抗剪性能及设计方法. 以上研究筛选出了 APP 油毡、玻纤格栅、沥青混凝土应力吸收层等沥青加铺层间防裂材料,但是,尚没有特别明确的抗拉强度指标限值要求,防裂材料的选择和设计尚存在一定的盲目性,因此,基于旧水泥板稳定和小变形的前提下,探索层间防裂抗拉强度计算方法和指标,以期 为理论研究和工程应用提供参考.

1 理论分析

1.1 受力分析

假设层间防裂材料为 APP 改性沥青油毡,在

水平面内各向同性. 均匀微小压力 p 作用下,属平面应变问题,APP 油毡受张紧的薄膜效应作用,薄膜上各点产生微小挠度 z ;设缝宽为 ξ ;防裂层呈圆形曲线,在 $x = \xi/2$ 处有最大挠度 f . 详见图 1、2.

设 APP 油毡单位宽度内受到拉力 T ,分析边长 dx 和 dy 微单元受力.

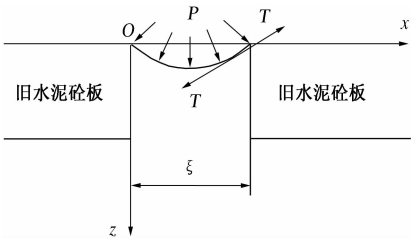


图 1 力学计算模型

Fig. 1 Model of mechanics computation

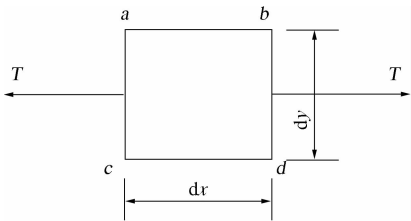


图 2 计算单元体

Fig. 2 Computing unit of APP modified bituminous linoleum

收稿日期:2014-11-27;修订日期:2015-01-09

基金项目:河南省自然科学研究计划资助项目(2011A580001);河南省交通运输厅科技项目(2010PIII10);交通部西部交通建设科技项目(200531881213)

作者简介:袁玉卿(1972-),男,河南洛阳人,河南大学副教授,博士,博士后,主要从事道路工程研究,E-mail: yroad@126.com.

由图 2 知,边 bd 、 ac 上拉力均为 Tdy , z 轴上投影分别为 $-Tdy \frac{\partial z}{\partial x}$ 、 $Tdy(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}dx)$. 微单元受到的总压力为 $pdx dy$. 由平衡条件 $\sum z_i = 0$ 得

$$-Tdy \frac{\partial z}{\partial x} + Tdy(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}dx) + p dx dy = 0, \quad (1)$$

整理得
$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = -\frac{p}{T}. \quad (2)$$

解微分方程(2)得

$$z = -\frac{px^2}{2T} + c_1x + c_2, \quad (3)$$

代入边界条件

$$\begin{cases} x=0, z=0 \\ x=\frac{\xi}{2}, z=f \end{cases}. \quad (4)$$

则有

$$z = \frac{8fTx - 2px^2\xi + px\xi^2}{4T\xi}. \quad (5)$$

式(5)代入边界条件

$$\begin{cases} x=\xi \\ z=0 \end{cases}, \quad (6)$$

得

$$T = \frac{p\xi^2}{8f}. \quad (7)$$

式中: T 为 APP 油毡所受拉力, N/m ; p 为作用于 APP 油毡上的压力, Pa ; ξ 为接(裂)缝宽度, m ; f 为 APP 油毡在荷载作用下产生的挠度, m .

1.2 变形分析

如图 3 所示,横缝宽按规范规定为 $3 \sim 8 \text{ mm}$, 所以 f 不可能大于 $\xi/2$. 事实上,当 $f > \xi/2$ 时,路面结构本身已严重破坏,防裂层已失去功能. 基于小变形,曲率圆的圆心不可能低于 APP 油毡未变形时的平面. 因此,只考虑 $f \leq \xi/2$ 的情形.

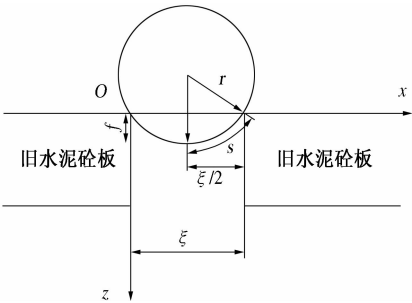


图 3 几何关系图示

Fig. 3 Sketch of geometric relationships

由图 3 可知曲率圆半径 r 为

$$r = \frac{\xi^2 + 4f^2}{8f}. \quad (8)$$

APP 油毡延伸率 ε 为

$$1 + \varepsilon = \frac{2r}{\xi} \arcsin \frac{\xi}{2r}. \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)可得

$$1 + \varepsilon = \frac{1 + 4(\frac{f}{\xi})^2}{4\frac{f}{\xi}} \arcsin \frac{4\frac{f}{\xi}}{1 + 4(\frac{f}{\xi})^2}. \quad (10)$$

令 $y = \varepsilon$, $x = \frac{f}{\xi}$, 则式(10)为

$$y + 1 = \frac{1 + 4x^2}{4x} \arcsin \frac{4x}{1 + 4x^2}, \quad (11)$$

$$\text{即 } (y + 1) \frac{4x}{1 + 4x^2} = \arcsin \frac{4x}{1 + 4x^2}. \quad (12)$$

式(12)两边对 x 求导数,整理得

$$y' + y \frac{1 - 4x^2}{x(1 + 4x^2)} = \frac{8x}{1 + 4x^2}. \quad (13)$$

式(13)对应的齐次方程为

$$y' + y \frac{1 - 4x^2}{x(1 + 4x^2)} = 0. \quad (14)$$

式(14)可化为

$$\frac{1}{y} dy = \frac{4x^2 - 1}{x(1 + 4x^2)} dx. \quad (15)$$

对式(15)两边积分,得齐次方程(14)的通解

$$y = \frac{4x^2 + 1}{x} c_1. \quad (16)$$

用常数变易法将式(16)中的 c_1 变为 u , 令

$$y = \frac{4x^2 + 1}{x} u. \quad (17)$$

则

$$\frac{dy}{dx} = u \frac{4x^2 + 1}{x} + u \frac{4x^2 - 1}{x^2}. \quad (18)$$

将式(18)代入非齐次方程(13)得

$$\frac{du}{dx} = \frac{8x^2}{(4x^2 + 1)^2}. \quad (19)$$

对式(19)积分,得

$$u = \frac{-x}{4x^2 + 1} - \frac{1}{2} \arctan 2x + c_2. \quad (20)$$

将式(20)代入式(17),得方程(11)的通解为

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{4x^2 + 1}{x} \arctan 2x - 1 + c_2 \frac{4x^2 + 1}{x}. \quad (21)$$

又知边界条件

$$\begin{cases} x = \frac{f}{\xi} = \frac{1}{2} \\ y = \varepsilon = \frac{\pi}{2} - 1 \end{cases}. \quad (22)$$

将边界条件(22)代入式(21),可得 $c_2=0$,所以式(21)可化为

$$y+1=\frac{4x^2+1}{2x}\arctan 2x,$$

(23)

令 $\psi=\arctan 2x,$

(24)

对式(24)进行麦克劳林展开,则有

$$\psi=\arctan 2x=2x-\frac{8}{3}x^3+\frac{32}{5}x^5-\cdots,$$

其中 $|2x|<1.$

(25)

将式(25)代入式(23),略去高次项化简可得

$$x=\frac{\sqrt{6}}{4}y^{0.5}.$$

(26)

又由 $y=\varepsilon,x=\frac{f}{\xi},$ 则

$$f=\frac{\sqrt{6}}{4}\xi\varepsilon^{0.5}.$$

(27)

2 数值模拟

2.1 模型建立

视路面结构为弹性层状体系,由上至下:沥青加铺层、防裂夹层、旧水泥混凝土路面和基础.采用 ANSYS 有限元软件,建立 3 维空间模型. APP 油毡采用 3 维薄膜单元,其它层采用 8 节点实体单元.为反映半无限大空间特性,基础深 9 m、宽 6.5 m、长 12 m.

2.2 计算参数

根据实际工程,水泥板长×宽×厚=5 m×4.5 m×0.28 m,其它参数见表 1.

表 1 各结构层计算参数

Tab.1 Calculation parameters of each structure layer

结构层	厚度 /cm	弹性 模量 /MPa	导热系		线膨胀 系数/ (℃ ⁻¹)
			泊松 比	数/ (W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	
沥青加 铺层	6	1 200	0.25	1.2	2.1×10 ⁻⁵
APP 油毡	0.3	20 ~ 5 000	0.45	1.0	1.0×10 ⁻⁵
旧水泥 混凝 土板	28	30 000	0.15	1.5	1.5×10 ⁻⁵
基础	—	300 ^①	0.35	1.0	0.5×10 ⁻⁵

注:①基础的弹性模量为原路面基层、底基层、垫层和路基的当量值.

采用 BZZ-100,轮胎内压 0.7 MPa,双轮间

距 31.95 cm,荷载圆半径为 10.65 cm.在最不利位置,即接缝单侧中部,施加 20 cm×40 cm 的均布荷载.

2.3 耦合应力

路面结构参考温度为 0℃,沥青加铺层表面降温幅度为 15℃,研究 APP 油毡夹层,在荷载与温度联合作用的耦合应力如图 4.

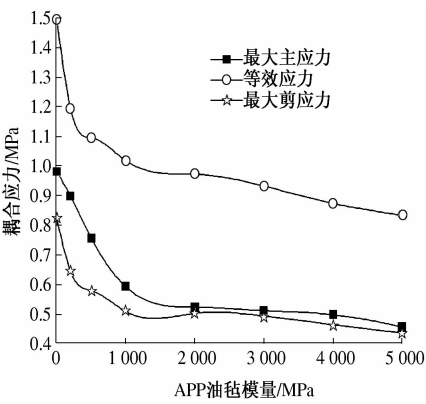


图 4 耦合应力随 APP 油毡模量的变化
Fig.4 Coupling stress changing with APP felt modulus

由图 4 知,当防裂层拉伸模量从 0 MPa(无夹层)增大到 1 000 MPa 时,耦合作用下最大主应力、等效应力、最大剪应力急剧减小.当防裂层拉伸模量从 1 000 MPa 增大到 5 000 MPa 时,应力曲线逐渐趋于平缓,说明此种工况对耦合应力消减作用趋于稳定.因此,防裂层的拉伸模量在 1 000 MPa 时经济技术效果最好.此时,最大主应力、等效应力及最大剪应力分别为 0.59 MPa、1.02 MPa、0.51 MPa.

3 层间抗拉强度指标分析

3.1 基于理论推导的抗拉强度指标

将公式(27)代入式(7)可得防裂层在缝上的张拉应力计算式

$$T=\frac{p\xi^2}{8f}=0.2p\xi\varepsilon^{-0.5}.$$

(28)

防裂层延伸率 ε 一般为 $30\%\leq\varepsilon\leq60\%$.取 $\xi=0.01$ m,根据式(28)计算抗拉强度如图 5.

由图 5 可知,防裂层的抗拉强度一般应在 500~4 500 N/m 之间,综合考虑各种因素,油毡的抗拉强度 $\leq 4\,000$ N/m.与通用表示方法一致,油毡的抗拉强度 ≥ 200 N/(50 mm).

3.2 基于数值模拟的强度指标

根据数值模拟的耦合应力,计算 APP 油毡的

抗拉强度及抗剪强度如图 6。

由图 6 知,当 APP 油毡层的拉伸模量从 0 MPa(无夹层)增大到 1 000 MPa 时,抗拉强度、抗剪强度急剧减小。此后,强度曲线逐渐趋于平缓。因此,选用 APP 油毡拉伸模量在 1 000 MPa 时经济技术效果最好。此时,抗拉强度、抗剪强度分别为 1 776.9 N/m,1 525.2 N/m。综合考虑各种因素,油毡抗拉强度 $\leq 2\,000\text{ N/m}$ 。与通用表达方法一致,抗拉强度 $\geq 100\text{ N/(50 mm)}$ 。

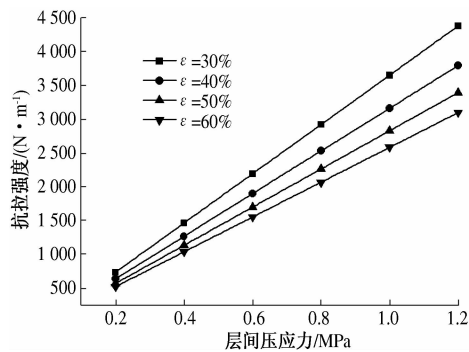


图 5 防裂层抗拉强度分析

Fig.5 Analysis of APP linoleum tensile strength

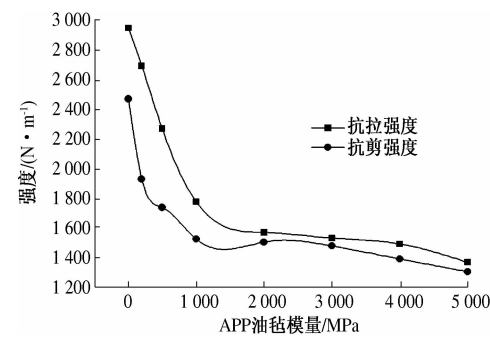


图 6 APP 油毡强度分析

Fig.6 Analysis of strength APP linoleum

综合考虑理论推导及数值模拟,安全系数^[13]取 1.5,因此,层间防裂材料的抗拉强度 $\leq 200\times 1.5=300\text{ N/(50 mm)}$ 。

4 结论

本研究是在诸多假定条件下进行的,计算结果具有一定的局限性和误差,为了保证防裂效果,旧路面基层必须稳定、板下无脱空。

(1)根据薄膜效应原理建立力学模型,进行受力分析,推导了 APP 油毡所受的拉力。

(2)根据曲率圆、缝宽度和挠度之间的几何关系以及延伸率的定义,经过变形分析,得到了挠

度的实用表达式。

(3)根据力学及变形分析,推导出了实用的抗拉强度计算式。

(4)建立有限元模型进行数值模拟,计算了车辆及温度荷载共同作用下的耦合应力。

(5)基于理论推导及数值模拟,防裂层的抗拉强度应 $\geq 300\text{ N/(50 mm)}$ 。

参考文献:

[1] 苗英豪,赵恩强,王书云,等.土工织物延缓沥青路面疲劳型反射裂缝的有限元分析[J].北京工业大学学报,2009,35(6):790-795.

[2] 李善强,王选仓.沥青加铺层反射裂缝发展疲劳模拟试验研究[J].中外公路,2009,29(2):190-193.

[3] 王选仓,刘凯,李善强.沥青加铺层夹层材料抗反射裂缝性能研究[J].建筑材料学报,2010,13(2):247-252.

[4] 朱宁.旧水泥混凝土路面沥青加铺方案优化及施工工艺[D].天津:河北工业大学土木工程学院,2010.

[5] 凌天清,李修磊,张剑,等.复合式路面层间夹层抗反射裂缝能力的模拟试验[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2010,29(4):536-539.

[6] 袁明,凌天清,张睿卓,等.复合式路面层间剪应力分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(6):1318-1322.

[7] 李侠.基于应力吸收层的水泥混凝土沥青加铺路面力学特性分析[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2012,44(3):420-425.

[8] 王小侠.寒区旧水泥路面沥青罩面层间技术研究[D].西安:长安大学公路学院,2011.

[9] 李祖仲,陈拴发,廖卫东,等.改性沥青应力吸收层混合料低温抗裂性能评价[J].中国公路学报,2012,25(4):29-35.

[10] 袁玉卿,高丹盈,王选仓.APP油毡用于旧水泥路面沥青加铺层间防裂[J].武汉理工大学学报,2012,34(4):48-51.

[11] 周燕,李美东,苑瑞星,等.应力吸收层贯入试验数值分析与试验方法评价[J].郑州大学学报:工学版,2012,33(1):6-10.

[12] 尚同羊,张苛,高涛涛,等.橡胶沥青应力吸收层设计方法探讨[J].郑州大学学报:工学版,2013,34(2):40-44.

[13] 蒋应军,戴经梁.土工织物在道路工程防裂中的应用.长安大学学报:自然科学版,2007,27(4):18-22.

Research on Tensile Strength Index of Anti-cracking Interlayer
between Old Cement Pavement and Asphalt Overlay

YUAN Yu-qing¹, LIU Feng-li¹, WANG Xuan-cang²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To explore tensile strength index of anti-cracking interlayer between old cement pavement and asphalt overlay, based on the special model of APP modified bituminous linoleum reinforced the structure, mechanical analysis, theoretical derivation and numerical simulation were put forward. Then, practical calculation formula of tensile strength of anti-cracking layer was also deduced. Finally, strength index was recommended. In the premise of small deformation, deflection value is proportional to crack width and elongation. Pulling force of anti-cracking sandwich is proportional to crack width and pavement pressure, and inverse to elongation. The anti-cracking interlayer with 1000 MPa modulus can obtain the best economic technology effect, when the maximum principal stress, equivalent stress and maximum shear stress are 0.59, 1.02 and 0.51 MPa, respectively. In consideration of the general test methods and expression, the tensile strength of APP linoleum should be not less than 300 N/50 mm.

Key words: road engineering; anti-cracking interlayer; overlay; old cement pavement; tensile strength; APP modified bituminous linoleum

(上接第 21 页)

[6] BARCHORSKI A, PAINTER M J, SMAILES A J, et al. Finite element prediction of distortion during gas metal arc welding using the shrinkage volume approach[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 92(93): 405 - 409.

[7] 龚曙光, 谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[8] TEKRIWAL P, MAZUMDER J. Finite element analysis of three dimensional transient heat transfer in GMA welding[J]. Welding Research Supplement, 1988, 16(7): 150 - 156.

[9] 肖冯, 米彩盈. T 型角接头焊接热源模型研究[J]. 电焊机, 2010, 40(6): 41 - 45.

[10] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1984, 15B(2): 299 - 305.

[11] 陈泽斌. 中厚板机器人双面双弧多道焊数值模拟[D]. 上海: 上海交通大学材料学院, 2013.

Numerical Simulation and Analysis of CO₂ Arc Welding
Temperature Field for Q345B Plate T-joint

WANG Dong, XIAO Bo, SONG Zhi-dong, HE Zong-hai

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on the APDL(ANSYS Parametric Design Language) of commercial finite element software ANSYS and selecting the double-ellipsoid heat source model, the finite element model of Q345B plate T-joint multi-layer and multi-pass welding is created. With the element birth and death technology and simulating the filling process of weld material by programming subroutine which activates the welding element step by step. The temperature field distribution regularities of the model under different welding speeds are analyzed and worked out the thermal cycling curves of typical positions. The simulation results are verified through experiment which prove the reliability of the welding simulation and provide some theoretical help to analysis the actual welding process.

Key words: CO₂ arc welding; T-joint; element birth and death technology; temperature field