

文章编号:1005-0523(2015)03-0042-08

基于“界面脱黏”的桥梁连续式伸缩缝力学分析

肖敏敏^{1,2}, 艾辉林²

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海应用技术学院, 上海 201418)

摘要:以“界面脱黏”病害为切入点,建立连续式伸缩缝结构有限元模型,在对有限元计算结果进行可靠性论证的基础上,探讨荷载作用位置、伸缩缝铺装与桥面铺装材料的模量比、伸缩缝铺装厚度及宽度、界面摩擦系数、桥端转角对界面法向拉应力的影响。结果表明:不同工况下的界面法向拉应力计算结果均在伸缩缝材料的允许拉应力范围之内,且选择柔性更大、变形协调更好的伸缩缝材料,并选择较厚的伸缩缝铺装、宽度选择45~50 cm,并且将界面进行粗糙化处理可有效地改善应力状态以减缓甚至避免“界面脱黏”病害。在此基础上,得出连续式伸缩缝铺装参数设计方法,为实体工程的设计和施工提供了新思路。

关键词:道路工程;连续式伸缩缝;界面脱黏;有限元;材料与结构设计

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

桥梁连续式伸缩缝是一种特殊的伸缩装置,其工作机理是依靠高粘弹性特种沥青结合料与石料形成的混合物的粘弹性来适应由于温度和交通荷载作用而产生的桥梁端部位移^[1]。其结构示意图如图1所示。该伸缩缝以其噪音小、行驶舒适、安装维修方便等优点,已经被广泛运用于中小跨径桥梁上。

由于该伸缩缝结构与材料的特殊性,其行为状态是不可预知的,因此出现了很多失效现象,其中以“界面脱黏”(即桥面铺装与伸缩缝铺装的界面脱开)尤为普遍(图2),该现象是连续式伸缩缝铺装常见病害之一,指的是伸缩缝铺装与桥面铺装之间的界面较为薄弱而发生脱开,这是界面表现出的一种材料粘结失效与开裂现象^[2-3]。

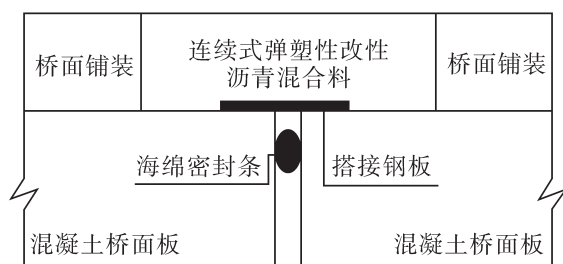


图1 连续式伸缩缝结构示意图

Fig.1 Continuous bridge expansion joint structure



图2 界面脱黏病害

Fig.2 Interface debonding disease

目前,国内外关于连续式伸缩缝的研究大多局限于伸缩缝填缝材料的开发:D.S.布朗公司开发出MatriXTM502伸缩缝填充料;美国万宝公司开发出WaboCrete II弹性混凝土;重庆智翔铺道技术工程有限公司开发出一种高性能弹塑体CEP;重庆交通大学对美佳沥青进行二次改性,制备出高温稳定性与抗老化能力更强的弹塑性改性沥青等。基于材料的开发,研究人员提出了一系列常规评价指标^[4],这些指标无法评

收稿日期:2015-04-05

基金项目:同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金项目(K201001);上海自然科学基金项目(13ZR1441100)

作者简介:肖敏敏(1983—),女,讲师,博士研究生,研究方向为道路结构与材料。

价伸缩缝结构的实际受力状况,且连续式伸缩缝的结构性能应力分析研究也极少。此外,现有研究对连续式伸缩缝的病害认识不足,对病害的处理只能用普通沥青混合料填补甚至将伸缩缝全部置换,缺乏较全面的病害机理分析。伸缩缝病害是伸缩缝结构与材料等共同作用的结果,仅从填缝材料性能单一方面来探寻病害成因并企图解决问题是远远不够的。

基于目前的研究现状,本文以界面脱黏病害为切入点,建立桥梁连续式伸缩缝结构的ANSYS有限元模型,研究荷载作用下材料及结构尺寸对关键力学控制指标的影响,揭示病害产生的机理,在此基础上形成伸缩缝铺装的参数设计方法,为连续式伸缩缝材料、结构尺寸等的选择提供有益参考。

1 有限元分析准备

1.1 荷载模型

城市道路桥梁采用城市-A、B级荷载作为桥梁设计荷载,其中,城-A级标准载重汽车采用五轴式货车加载,总重700 kN,前后轴距为18.0 m,行车限界横向宽度为3.0 m^[5]。城-A级最大轴重200 kN的接地面积为0.25 m×0.6 m矩形荷载,道路设计中的计算荷载为双轮荷载,在这里假设轮载接地面积为正方形,单轮接地面积一定,则可将后轴矩形荷载转化为0.25 m×0.25 m双正方形荷载。本文考虑选取城-A级荷载的最大轴重200 kN作为分析荷载,其接地面积为4个0.25 m×0.25 m正方形荷载,荷载分布如图3所示。

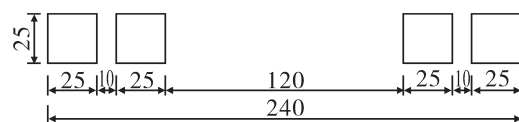


图3 等效双轮均布荷载平面图(单位:cm)

Fig.3 Two-wheeled equivalent uniformly distributed load

1.2 有限元模型、边界条件

选取两跨简支桥梁(单跨15 m)连续式伸缩缝结构建立有限元模型。设纵桥向(行车方向)为 x 向,横桥向为 z 向,垂直于桥面铺装的方向为 y 向。

连续式伸缩缝结构由桥面铺装、伸缩缝铺装、素混凝土层、跨缝板和桥面板组成,其中伸缩缝铺装宽(x 向)0.55 m,伸缩缝铺装两侧的桥面铺装宽15 m,跨缝板宽0.15 m,素混凝土层及梁板宽15.25 m;伸缩缝铺装厚(同伸缩缝铺装厚, y 向)0.1 m,跨缝板厚0.01 m,素混凝土层厚0.02 m,梁板厚0.5 m;桥面铺装、伸缩缝铺装、素混凝土层、跨缝板和桥面板长(z 向)均为3 m。

桥面铺装、跨缝板、素混凝土层、梁板均采用有限元的实体单元Solid45模拟,伸缩缝铺装材料由于模量较小,采用实体单元Solid65模拟,伸缩缝铺装与桥面铺装的界面用接触单元Conta173与Targe170模拟。边界条件为铺装结构底部简支,端部节点施加 x, z 方向约束。

1.3 计算参数

假定伸缩缝铺装结构各组成部分在荷载的作用下表现为一种瞬时弹性行为,因此取20℃抗压模量值作为各材料的模量。设桥梁铺装材料、跨缝板、素混凝土、梁板的模量分别取1 000,22 000,22 000,36 000 MPa。

选择当今市场上常见的3种连续式伸缩缝填缝材料,采用旋转压实成型,试件尺寸为直径(100±2.0) mm、高(100±2.0) mm,将试件置于20℃的恒温水箱中保温2.5 h以上,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中沥青混合料单轴压缩试验方法分别测定3种填缝料的抗压回弹模量,试验结果如表1所示。

由表1可得,市面上的填缝料模量约为200 MPa。基于伸缩缝填充材料的特殊性,要求其具有一

定的刚度和延伸性,故与普通的桥面铺装材料模量相差较大,因此取伸缩缝材料模量与桥梁铺装材料模量之比分别为0.05,0.2,0.5,0.8,1,即伸缩缝材料的模量分别取50,200,500,800,1 000 MPa。

表1 填缝料压缩试验结果

Tab.1 Test results of joint sealant compression		
试验温度	填缝料类型	抗压回弹模量/MPa
20℃	填缝料1	199.05
	填缝料2	192.41
	填缝料3	198.63

桥面铺装及伸缩缝铺装的厚度是一致的,分别取值4,6,8,10,12,14 cm;伸缩缝铺装的宽度分别取值35,45,55,65 cm;界面摩擦系数分别取值0,0.2,0.5,0.8,1;桥端转角分别取值1/100,1/125,1/150,1/175,1/200,1/225,1/250,1/375,1/500。

2 有限元计算结果的可靠性验证

伸缩缝铺装与桥面铺装之间是由热熔状态下的弹塑性改性沥青粘结的,铺装材料经受荷载的反复作用而发生拉伸或压缩变形,当两种铺装的界面作用较弱不足以抵抗两端铺装材料的变形时,便会出现界面脱黏病害。“界面脱黏”的主要成因是由于伸缩缝铺装与桥面铺装界面的拉应力不足以抵抗外界对界面的拉伸作用,因此,采用界面法向拉应力作为分析“界面脱黏”的指标^[6-7]。

第1.2节建立的是有限元局部模型,局部分析模型在减少运算量和便于荷载施加等方面优势明显,但是局部模型的合理性也是影响计算结果的重要因素。本节以界面法向拉应力作为控制指标,通过对有限元模型纵向及横向尺寸、荷载作用区网格密度大小、布载等情况的比选,实现验证有限元计算结果可靠性的目的。

2.1 有限元模型尺寸的选择

以1.2节建立的有限元模型为基础,变化桥面铺装的行车道宽度,分别选择单车道(车道宽3 m)、双车道(车道宽6 m)、四车道(车道宽12 m),计算车道宽度变化下的界面法向应力极值,结果如表2所示。可知,3种工况下的应力相差很小,考虑计算的简便性,选择单车道3 m作为连续式伸缩缝的长度。

表2 不同模型尺寸下应力计算结果

Tab.2 Stress calculation results under different sizes of model

模型尺寸	单车道(车道宽3 m)	双车道(车道宽6 m)	四车道(车道宽12 m)
界面法向拉应力/MPa	0.392	0.393	0.393

2.2 荷载作用区网格密度的确定

有限元分析的计算精度对单元尺寸很敏感,在边界和荷载条件等不变的情况下,有限元模型的应力值将随着网格密度有所差别,网格密度越大,计算值越收敛。因此在划分网格时需注意网格密度、网格疏密、单元阶次、网格质量等因素。

讨论单元网格大小对连续式伸缩缝铺装受力的影响,荷载作用区域网格尺寸 $l \times w$,其中 l 为横桥向长度, w 为纵桥向宽度,网格大小分别定为 $20 \times 10, 10 \times 10, 10 \times 5, 5 \times 5, 2 \times 2, 1 \times 1 \text{ cm}^2$,考察界面法向拉应力在荷载作用下随单元尺寸的变化情况,结果如表3所示。

表3 不同单元尺寸下应力计算结果

Tab.3 Stress calculation results under different cell size

控制指标	单元尺寸/cm					
	20×10	10×10	10×5	5×5	2×2	1×1
界面法向拉应力/MPa	0.125	0.254	0.323	0.392	0.392	0.392

由表3可知,网格尺寸越小,应力值呈不断增大的趋势,在 $5 \times 5 \text{ cm}$ 的尺寸下达到收敛。基于平衡极端资源与计算精度之间的矛盾,即合理的分析模型是采用尽量短的时间得到满足要求的结果,本文将采用 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的单元尺寸作为荷载作用区域尺寸。

2.3 轴载的确定

在整车全桥布载时,桥梁结构将承担多轴荷载同时作用,不同轮轴之间的荷载耦合与叠加作用可能会对伸缩缝铺装层结构受力状态产生影响。表3.10所示为不同轴载下伸缩缝铺装层控制指标计算结果。

由表4可得,城A级轴载与单轴200 kN的界面应力计算结果基本相同,说明城A级其他轴的作用对

200 kN轴区域的受力影响可以基本忽略,也说明进行伸缩缝铺装力学分析时,可以省略多轴而仅考虑单轴荷载作用情况。

综上可得,第1节选取的有限元计算模型及参数合理,所得的有限元计算结果可靠。

3 影响因素分析

利用有限元程序 ANSYS 建立连续式伸缩缝铺装力学分析模型^[8],考察荷载作用位置、填缝料与桥梁铺装材料的模量比、伸缩缝铺装厚度^[9]、宽度、界面摩擦系数、桥端转角等因素的变化对界面法向拉应力的影响。

3.1 荷载作用位置的影响

计算时考虑四种荷载的作用形式,即(1)荷载作用在桥面铺装一侧且轮迹边缘位于相交线上(位置1);(2)荷载作用横跨桥面铺装和伸缩缝铺装的相交线(位置2);(3)荷载作用在伸缩缝铺装一侧且轮迹边缘位于相交线上(位置3);(4)荷载作用在伸缩缝铺装上(位置4)。这四种荷载作用位置如图4所示。4种荷载作用下界面法向拉应力极值计算结果如表2所示。

表4 不同轴载下应力计算结果

Tab.4 Stress calculation results under different axle loads

轴载	城 A 级	单轴 200 kN(双轮)
界面法向拉应力/MPa	0.392	0.392

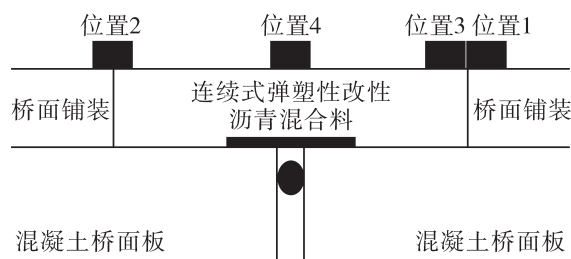


图4 荷载作用位置
Fig.4 Load position

表5 不同荷载位置作用下的应力计算结果

Tab.5 Stress calculation results in different load action position

界面法向拉应力极值/MPa	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4
	0.815×10^{-4}	0.388	0.392	0.021

由表5可得,荷载作用在位置3时界面法向拉应力极值均较其他位置的大,综合考虑下,取位置3——即荷载作用在伸缩缝铺装一侧且轮迹边缘位于相交线上为最不利荷载位置。

3.2 模量比的影响

桥面铺装材料模量 1 000 MPa 不变,伸缩缝材料与桥面铺装模量比分别取值 0.05, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 考察模量比变化对界面法向拉应力的影响,结果如表6所示。

表6 模量比变化下界面法向拉应力变化情况

Tab.6 Effects of modulus ratio on normal tensile stress of interface

控制指标	模量比				
	0.05	0.2	0.5	0.8	1
界面法向拉应力/MPa	0.391	0.392	0.393	0.395	0.397

由表6可得:

1) 随着模量比的不断增加,法向拉应力均呈不断增加的趋势,模量比从0.05增至1,应力增加了1.5%;且界面拉应力与模量线性相关,相关系数为0.969 3。由于界面法向拉应力极值的作用位置在伸缩缝铺装上,计算结果表明伸缩缝铺装材料的模量越小,对材料的应力作用就越小。因此,模量比的减小有助于减小应力,为了降低荷载作用下伸缩缝与铺装层的界面应力,延缓界面开裂的速度,应适当降低伸缩缝材料的模量,宜选择柔性更大、变形协调更好的材料作为伸缩缝填料。

2) 不同填缝料模量时,界面法向拉应力随模量比的变化曲线趋势基本重合,可采用线性规律描述两者关系,如式1所示。

$$\sigma = 0.0052(E_j/E_p) + 0.39096 \quad (1)$$

其中: σ 为界面法向应力(MPa); E_j/E_p 为伸缩缝材料模量(E_j)与桥面铺装模量(E_p)之比。

3.3 伸缩缝厚度的影响

计算伸缩缝铺装层厚度变化对界面法向拉应力的影响情况,结果如图5所示。其中,伸缩缝与铺装层模量比选取0.05,0.2,0.5,0.8,1,铺装厚度选0.04,0.06,0.08,0.1,0.12,0.14 m。可以得到如下结论:

1) 随着铺装层厚度的增加,界面法向拉应力逐渐降低,厚度由4 cm增加至14 cm时,界面法向拉应力降幅为25.7%。说明厚度的增加将有利于缓解伸缩缝与铺装层界面开裂的风险。一方面,厚度增加将降低伸缩缝与铺装层界面法向应力的水平;另一方面,一旦伸缩缝与铺装层层底首先发生开裂,厚度增加也延迟了裂缝向上反射的速度,间接延长了桥面伸缩缝的使用寿命。

2) 随着模量比的增加,界面法向应力-铺装厚度变化曲线线位有所提高。同时随着模量比增加界面法向应力随铺装厚度增加而衰变的趋势也增加。即当铺装层模量与伸缩缝模量接近时,铺装厚度的增加对界面法向应力的降低效果明显,反之,当铺装层模量与伸缩缝模量相差很大时,铺装厚度的增加对降低界面法向应力的作用不显著。

根据图5,将铺装厚度与界面法向应力之间建立数值关系:

$$\sigma = -0.7063 \times H + 0.2890 \left(\frac{E_j}{E_p} \right) - 1.45 \left[H \times \left(\frac{E_j}{E_p} \right) \right] + 0.434 \quad (2)$$

其中: H 为铺装层厚度(m); E_j/E_p 为伸缩缝模量(E_j)与桥面铺装模量(E_p)之比。

3.4 伸缩缝宽度的影响

分析伸缩缝铺装宽度变化对界面法向拉应力的影响情况,其中宽度分别取值35,45,55,65 cm。

表7 铺装宽度变化下界面法向拉应力变化情况

Tab.7 Effect of pavement width on normal tensile stress of the interface

控制指标	铺装宽度/cm			
	35	45	55	65
界面法向拉应力/MPa	0.393	0.392	0.392	0.391

计算结果列于表7,可得:随着铺装宽度不断增加,界面法向拉应力呈不断减小的趋势,但减小的幅度很小,根据施工经验,选择45 cm的宽度较为合适,因为如果宽度太小,伸缩缝铺装范围内易出现裂缝;宽度太大则会造成伸缩缝铺装层的支承能力薄弱,会多发车辙、推移等现象,且也提高了整个伸缩缝的造价。因此,在选择最佳伸缩缝宽度时,应综合工程的实际情况,本文推荐45~50 cm为最佳伸缩缝宽度。

3.5 界面摩擦系数的影响

伸缩缝铺装与桥面铺装界面摩擦系数分别取值0,0.2,0.5,0.8,1,分别计算界面接触条件变化对界面应力的影响情况,计算结果列于表5。

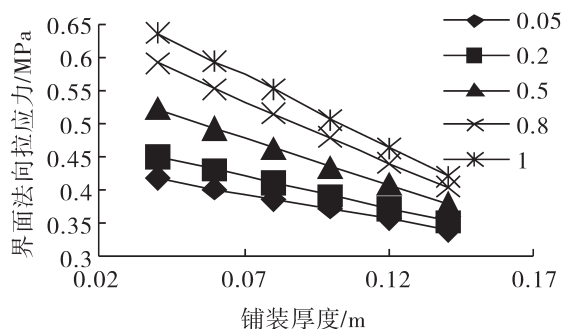


图5 铺装厚度与界面法向拉应力的关系

Fig.5 Relationship of pavement thickness and normal tensile stress of the interface

表8 界面摩擦系数变化下界面法向拉应力变化情况

Tab.8 Effect of interface friction coefficient on the interface's normal tensile stress

控制指标	摩擦系数				
	0	0.2	0.5	0.8	1
界面拉应力/MPa	0.394	0.392	0.389	0.385	0.384

由表8可得:摩擦系数从0增加到1,界面法向拉应力减小了2.5%,说明摩擦系数的增加有利于减小界面法向拉应力。因此,为了提高伸缩缝铺装与桥面铺装界面处的抗拉性能,将界面进行粗糙化处理是有必要的。

3.6 桥端转角的影响

桥端转角分别取值1/100,1/125,1/150,1/175,1/200,1/225,1/250,1/375,1/500,分别计算桥端转角变化对界面应力的影响情况,计算结果列于表9。

表9 桥端转角变化下界面法向拉应力变化情况

Tab.9 Effect of bridge side angle on the interface's normal tensile stress

控制指标	桥端转角/弧度								
	1/100	1/125	1/150	1/175	1/200	1/225	1/250	1/375	1/500
界面拉应力/MPa	0.394	0.394	0.394	0.393	0.393	0.393	0.392	0.392	0.392

由表9可得:桥端转角越大,界面拉应力值也就越大,桥端转角的变化对界面拉应力的影响很小,几乎可以忽略不计。

参考沥青路面设计标准,要求连续式伸缩缝界面法向拉应力小于铺装材料的容许应力,即 $\sigma_r \leq \sigma_R$,其中: $\sigma_R = \frac{\sigma_{sp}}{k_s} = \frac{\sigma_{sp}}{0.09A_a \times N_e^{0.22}/A_c}$,由室内试验可得连续式伸缩缝铺装材料的劈裂强度为1.5 MPa, A_a 取1, A_c 取1, N_e 取 1.2×10^7 次(根据连续式伸缩缝适用轻、中等交通及部分重交通),得 σ_R 为0.469 MPa,则第3节有限元计算的界面法向拉应力均满足 $\sigma_r \leq \sigma_R$,如大于此值,则界面粘结失效,出现界面脱黏现象。

4 基于界面拉应力控制的连续式伸缩缝铺装参数设计方法探讨

第3节的研究结果表明,伸缩缝铺装宽度、界面摩擦系数及桥端转角的变化对界面法向拉应力的影响不大,因此本文主要关注模量比与伸缩缝铺装厚度对应力的影响,探讨界面法向拉应力为控制指标的连续式伸缩缝铺装参数设计方法^[10-12]。

3.2与3.3节得到了伸缩缝设计参数与力学指标之间的数值关系,建立了基于铺装材料模量比(E_j/E_p)、铺装厚度(H)对界面法向应力 σ 之间的数值关系,如式1和式2。以下将基于上述关系提出伸缩缝设计参数的确定方法,为连续式伸缩缝的设计提供参考。

将式1和式2汇总后得到图6(铺装厚度、模量比与界面法向应力基本关系图)。为了便于分析,将界面法向应力 σ 作为横坐标,而模量比 R 与铺装厚度 H 分别作为纵坐标,得到的两个关系分别为: $R(\sigma)$ 和 $H(\sigma)$,可以看出随界面法向应力的增加,模量比增加;随界面法向应力的增加,铺装厚度降低。因此两条曲线存在一交点 σ_i 。

从设计者的角度看,铺装厚度越小越经济,同时较薄的铺装将减小桥梁恒载,对结构有利,但减小厚度将提高界面法向应力的水平,从而增加界面粘结措施的费用。由力学分析可知,伸缩缝与铺装层模量比越小,界面法向应力也小,通过降低伸缩缝材料模量可以达到降低模量比的目的,而降低伸缩缝材料模量需要采用柔韧性能更好的材料,这将增加伸缩缝材料的造价。反之,提高模量比,虽然提高了 σ ,但降低了造价,因此 $R(\sigma)$ 随 σ 增加而增加的过程是一个降低的过程。综合考虑,当满足 $\sigma = \sigma_i$ 时的模量比 R 与厚度

H 的组合将达到技术经济的最佳,因此确定伸缩缝设计参数将据此进行。

在图6中,根据伸缩缝材料与桥面铺装材料的模量比范围 $[R_{\min}, R_{\max}]$ 可以确定相应的界面法向应力范围,图中为 $[\sigma_1, \sigma_3]$;由桥面铺装层厚度范围 $[H_{\min}, H_{\max}]$ 可以确定相应的界面法向应力范围,图中为 $[\sigma_2, \sigma_4]$ 。上述两个范围的公共部分为: $[\sigma_2, \sigma_3]$ 。

必须满足 $[\sigma] > \sigma_2$,使桥面铺装柔性伸缩缝体系才能进行后续设计,当界面容许法向应力 $[\sigma] < \sigma_2$ 时,需要重新选择伸缩缝材料或铺装材料,直至满足 $[\sigma] > \sigma_2$ 。

当满足 $[\sigma] > \sigma_2$ 条件后,需要从两方面考虑:

- 1) 当 $[\sigma] > \sigma_i$ 时,以 $\sigma = \sigma_i$ 时对应的铺装模量比 R 和厚度 H 作为伸缩缝最佳设计参数组合。
- 2) 当 $[\sigma] < \sigma_i$ 时,以 $\sigma = [\sigma]$ 时对应的铺装模量比 R 和厚度 H 作为伸缩缝设计参数可行组合。即:伸缩缝与铺装材料模量比 $R = R([\sigma])$,桥面铺装厚度 $H = H([\sigma])$ 。

5 工程实践

该实体工程为一伸缩缝改造工程,地点位于福建省福州市区某城市桥梁上,桥梁所在路段为双向八车道,该路段的交通量情况为:通行的车辆速度较快;重型车辆较多。需要改造的伸缩缝为型钢伸缩缝,横跨四个车道,其中靠近中央分隔带的伸缩缝破损较为严重,已出现明显的啃边及混凝土破碎现象。

将旧的伸缩缝改造为连续式伸缩缝,将弹塑性改性沥青混合料填入其中,模量为 200 MPa;伸缩缝铺装与桥面铺装的界面处理方法为:在填入弹塑性沥青混合料之前,用热熔的弹塑性改性沥青(温度在 180℃ 以上)均匀涂抹于界面处;伸缩缝的改造尺寸为:厚度 8 cm(与原桥面铺装的厚度一致),宽度 50 cm,长度 15 m。

该实体工程于 2012 年 6 月中旬施工,历时两天,改造效果良好,通车情况正常,汽车行驶平稳,无跳车感。项目完成后,对该伸缩缝进行跟踪观测,历时一年后,于 2013 年 6 月拍摄现场情况,发现伸缩缝表面仍旧保持平整,无任何“界面脱黏”病害及其他破损现象。对改造好的伸缩缝进行现场检测,其试验数据如表 10 所示,结果显示符合连续式伸缩缝的质量检测标准。

表 10 连续式伸缩缝的检测结果及质量评定标准

Tab.10 The test results and quality evaluation standards of continuous expansion joints

试验项目	检测结果(每条伸缩缝测 3 处)			质量标准
平整度/mm	1	1	2	± 4
油石比	1:3	1:3	1:3	$\pm 0.3\%$
厚度/mm	100	100	100	设计值的+10%

6 结语

本文对桥梁连续式伸缩缝铺装结构进行了有限元力学分析,得出相关结论如下:

- 1) 首次从连续式伸缩缝常见病害“界面脱黏”入手,通过分析病害成因,提炼出界面脱黏的力学控制指标——界面法向拉应力,为后续连续式伸缩缝的病害防治及结构、材料设计提供新思路;
- 2) 在对有限元计算结果进行可靠性论证的基础上,探讨了荷载作用位置、填缝料与桥梁铺装材料的模量比、伸缩缝铺装厚度、宽度、界面摩擦系数、桥端转角等因素的变化对界面法向拉应力的影响,得出以下结论:模量较小的伸缩缝铺装材料、较厚铺装、伸缩缝宽度 45 ~ 50 cm、界面做粗糙化处理、严格控制桥端转角对缓解界面拉应力有效。以上建议对施工过程中的材料选择、结构尺寸设计、界面处理具有重要参考价值。

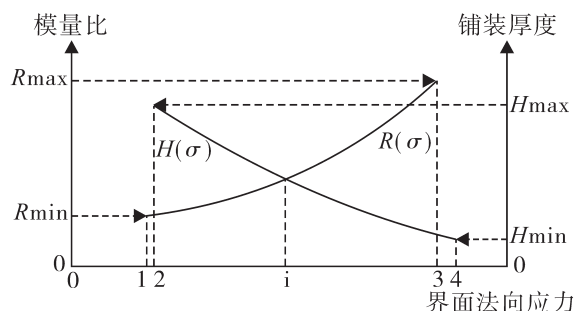


图6 铺装厚度、模量比与界面法向拉应力基本关系
Fig.6 Relationship of pavement thickness, modulus ratio and interface's normal tensile stress

3) 通过验算各种工况下的界面法向拉应力有限元计算结果在伸缩缝材料的容许拉应力范围内,进一步论证有限元计算的可靠性。

4) 基于界面法向拉应力影响较大的两个因素——模量比与伸缩缝铺装厚度,综合考虑最佳技术经济条件,探索了连续式伸缩缝铺装的参数设计方法,也为新旧拼接路面结构分析提供新的研究方法。

参考文献:

- [1] 李杨海,程海洋,鲍卫刚,等.公路桥梁伸缩装置实用手册[M].2版.北京:人民交通出版社,2007:45-48.
- [2] JOAO MARQUES LIMA, JORGE DE BRITO. Inspection survey of 150 expansion joints in road bridges [J].Engineering Structure , 2009(31):1077-1084.
- [3] 胡朋,柳志军.加速加载条件下沥青路面疲劳破坏分析[J].山东交通学院学报,2010,18(1):74-77.
- [4] LIANTONG MO, DONGLIN SHU, XUN LI. Experimental investigation of bituminous plug expansion joint materials containing high content of crumb rubber powder and granules [J].Materials and Design,2012(37):137-143.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市桥梁设计规范[R]. 2011:31.CJJ 11-2011.北京:中国建筑工业出版社.
- [6] 赵岩荆,蒋玲.水泥混凝土桥梁双层桥面铺装结构力学分析[J].武汉理工大学学报,2014,38(2):352-353.
- [7] 刘黎萍,等.基于抗剪性能的混凝土桥沥青铺装设计方法[J].同济大学学报,2013,41(1):89-92.
- [8] 祁文洋,孔晨光,于增义.纵坡弯道桥面沥青铺装结构剪应力分析[J].华东交通大学学报,2014,31(3):19-20.
- [9] PHILIP PARK, SHERIF EI-TAWIL, PH D, P E, F ASCE, et al. Improved geometric design of bridge asphalt plug joints[J].Journal of Bridge engineering,2011,129(4):158.
- [10] MARTIN A E, WALUBITA L F, HUGO F,et al.Pavement response and rutting for full scale and scaled APT[J].Journal of Transportation Engineering,2003,129(4):451-461.
- [11] PHILIP PARK, SHERIF EI-TAWIL, SANG YEOL PARK, et al. behavior of bridge asphalt plug joints under thermal and traffic loads[J]. Journal of Bridge Engineering,2010,5-6:250.
- [12] SIRIN O,TIA M,ROQUE R,et al. Evaluation of performance characteristics of the heavy vehicle simulator in Florida[J].Building and Environment,2007,42(3):270-277.

Mechanical Response Analysis of Bridges' Continuous Expansion Joint Based on Interface Debonding

Xiao Minmin^{1,2}, Ai Huilin²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: Aiming at interface debonding disease, this study adopts finite element method to analyze the mechanical response of the expansion joint pavement. On the basis of expounding and proving the finite element calculation results, the interface's normal tensile stress under the condition of the different load position, the interface contact state, the modulus ratio of expansion joint pavement and bridge pavement, the thickness and width of expansion joint pavement, bridge side angle are discussed. The results show that the finite element calculation results of the interface's normal tensile stress under different conditions are in the scope of the expansion joint gap filling material's allowable tension stress, and in order to improve the stress state effectively to slow down or even avoid the "interface debonding" diseases, it is necessary to choose appropriate, flexible and thicker expansion joint material with pavement width 45-50cm for achieving the interface roughness. It finds the parameter design method of the expansion joint pavement provides new thought for the real engineering design and construction.

Key words: road engineering; continuous expansion joint; interface debonding; finite element method; material and structure design

(责任编辑 王建华)