

桥梁无缝化改建对接界沥青路面受力影响

陆元春¹,傅梅¹,丛林²,李学良²,丁鹤洋²

[1.上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125; 2.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海市 201804]

摘要:为研究服役期内的既有中小跨径桥梁的快速、低成本、低影响无缝化改建对桥头搭板区域沥青路面温度响应的影响,选取了温度场、台后填土摩阻系数为研究参数,进行了有限元力学仿真建模分析并进行了工程验证。研究及应用工程长期监测的结果表明,既有中小跨径桥梁在完成快速、低成本、低影响的无缝化改建后,通过搭板端部的特殊构造及多项加强加劲措施,在循环隐形缝范围内路面的使用性能及耐久性良好,可有效延缓改建区域接界沥青路面反射裂缝的产生时间。研究可为服役期内的既有桥梁无缝化改建的结构设计与应用以及后续养护维修工作提供理论和数据上的支撑。

关键词:无缝化改建;有限元仿真;桥头搭板;沥青路面;温度响应;摩阻系数

中图分类号: U441+.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0253-07

0 引言

桥梁伸缩缝是为了消除梁体长度在温度的作用下发生变化而产生位移、并保持行车平顺而设置的桥梁伸缩装置^[1]。桥梁伸缩缝在长期直接经受车辆荷载的反复碾压和冲击作用下,极易发生结构破坏。桥梁伸缩缝装置在新建桥梁构造中的费用相对较低,但是由于其服役时间较短,需要经常进行维修及更换,导致每年用于桥梁伸缩缝装置的维修和更换费用较高,约为 10 亿元,且呈逐年增长趋势。同时,进行桥梁伸缩缝的更换维修施工时,通常需要封闭行车道,而高等级公路的交通流量较大且行车速度较快,封闭行车道往往会造成巨大的交通压力与不良社会影响。最重要的是,当桥梁伸缩缝发生不同程度的损坏时,将加剧车辆对桥梁上部结构的冲击,进而对桥梁整体结构的正常服役性能产生影响,最终导致桥梁的整体服役寿命降低。此外,桥梁伸缩缝的损坏还会使车辆行驶至伸缩缝时发生较为明显的跳车现象,使驾驶员产生一定程度的恐慌心理,进而给驾乘人员的乘车安全带来一定威胁^[2-7]。同时,伸缩装置破损处是腐蚀源头,也会减少桥梁的使用寿命。

因其横向穿越道路路面,是唯一在日常养护和维修时也需临时封闭现状交通的非全寿命桥梁构

件,其易损难修的世界性难题对现状交通、运营维护、桥梁使用寿命、道路和城市品质等产生了显著的负面影响,产生的病害在桥梁运行维护相关的总病害中占比约 50%。

针对上述问题,可采取两种解决途径:一是致力于设计、生产质量和性能更好的伸缩装置;二是尽量减少乃至直接取消伸缩装置的使用。无伸缩装置桥梁便是基于第二种理念提出的。对于中小跨径桥梁,可采取(半)整体式的无缝桥梁设计,从而改善桥头伸缩缝处产生的跳车和噪音状况,并减少经常性的维修和更换需求。由于这种设计能够从根本上解决桥面伸缩装置容易受损的问题,无伸缩缝桥梁(即无缝桥)作为一种维护成本较低的桥型和重要技术正受到越来越多的关注。无缝桥桥面具有良好的整体性,能使得行车平顺、舒适,降低桥梁全寿命周期成本,具备显著的经济效益和社会效益^[8]。一般做法是取消全桥的伸缩缝,包括主梁端与桥台之间的伸缩缝,将主梁、桥台和搭板(即沉降板)紧密连接,把主梁的伸缩变形传递至接线路面,通常在搭板末端与接线路面之间设置道路缩胀缝,来吸纳桥梁的变形。

我国改革开放 30 多年,修建了大量的新桥,其中不乏大规模、大跨度的桥梁,然而对于量大面广的中小型桥梁重视度不够,无缝桥梁没有像国外发达国家那样伴随着高速公路的发展而迅速发展,修建的大量中小跨径桥梁仍属于有缝桥梁。可能的原因有两点:一是我国目前正处于大规模建设时期,对于桥头跳

收稿日期: 2023-12-20

作者简介: 陆元春(1964—),男,本科,教授级高级工程师,从事桥梁工程设计和技术研究工作。

车、噪声、结构腐蚀等病害产生的根源认识不足,对于正常运营情况下伸缩缝损坏的维修养护问题及极端环境条件下桥梁的抗灾能力问题重视不够,对于无缝桥梁的研究投入不足;二是目前我国对建设速度的要求较高,导致业主与设计人员对无缝桥等新桥型的采用存在工期上的担忧^[4]。

根据2020年发布的交通运输行业发展统计公报可知,目前我国公路桥梁总数已达91.28万座,其中,中、小跨桥梁占比已经超过了86%,且呈现逐年递增的趋势^[9]。因此,对服役期内的既有桥梁进行无缝化改建,既有现实的需要,也深受桥梁管理养护者的欢迎,并可由此带动新建无缝桥梁的发展^[4],对于提升城市和交通环境品质,所产生的综合社会效益显著。

1 工程概况

对上海市嘉定区某一既有桥梁——伊宁路盐铁塘桥进行无缝化改建时,针对既有桥梁改建的特殊建设条件(须最大程度地利用既有结构,以满足施工期间现状交通要求),研发既有桥梁快速、低成本、低影响无缝化改建的设计和施工方法,方案如图1所示。通过将桥梁上部与台后搭板的桥面整体化,优化伸缩位置及埋藏深度,改变了普通有缝桥的桥面体系,达到取消伸缩缝的目标。采用UHPC新材料实现桥面整体化连接,有可靠、耐久、便捷的优势。改建后,允许主梁产生温度伸缩的位置被搭板延伸至尾端,形成类似道路上的胀缝。如果不采取相应措施,则易产生反射裂缝。

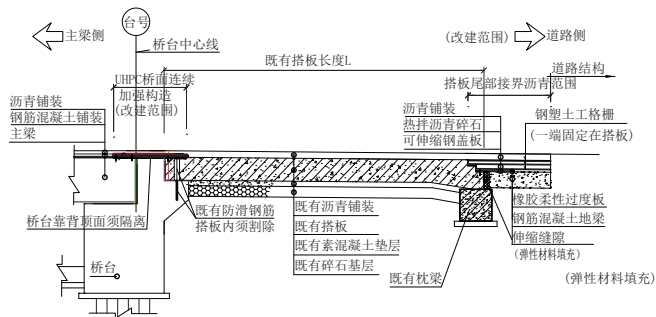


图1 既有桥梁无缝化改建方案示例

无缝桥中的缝是在道路上,结构相对简单,病害也少,养护、维修也容易得多。然而,搭板与道路之间的接缝,不能将其简单地视为道路的胀缝,它所受的胀缩量要大于一般的道路胀缝,如果处理不好,在缝或与之相临的道路胀缝将出现病害,这也是整体桥或半整体桥最常见的病害。因此,可以说,在整体桥或半整体桥的建设中至今没有解决的最重要的

问题,就是要找到经济合理、耐久性好的循环控制缝(cycle-control joint),即台后搭板与路面之间的缝^[4]。

一般情况下,反射裂缝发生的时间与沥青路面厚度成正比。故研发技术通过采取伸入路基搭板的端部特殊加肋构造和多项加强加肋措施,可使桥梁随温度产生的伸缩由台后路基协同吸收,以延缓反射裂缝的发生。

2 桥头搭板有限元模型建立

2.1 模型与假定

根据此种结构设计,进行有限元模拟仿真,分析搭板尾部区域的沥青路面因温度变化而产生的应力响应差异。分析模型包括沥青铺装层、半刚性基层、碎石层、回填土、桥头搭板和桥台。假定所有材料的力学性能都是在线弹性范围内,并且不考虑具体的施工过程(即不设置最小摊铺厚度)。

对无缝式道面结构的一般形式稍作简化,建立有限元模型,为44 m(2×22 m)的双跨桥梁与50 m的道路,宽为16.25 m,中间设有567 mm桥面连续构造和8 m的搭板作为衔接,下侧设地基。对桥梁及道路的各项设置与实际情况基本一致,完整模型及各结构层形式如图2所示。

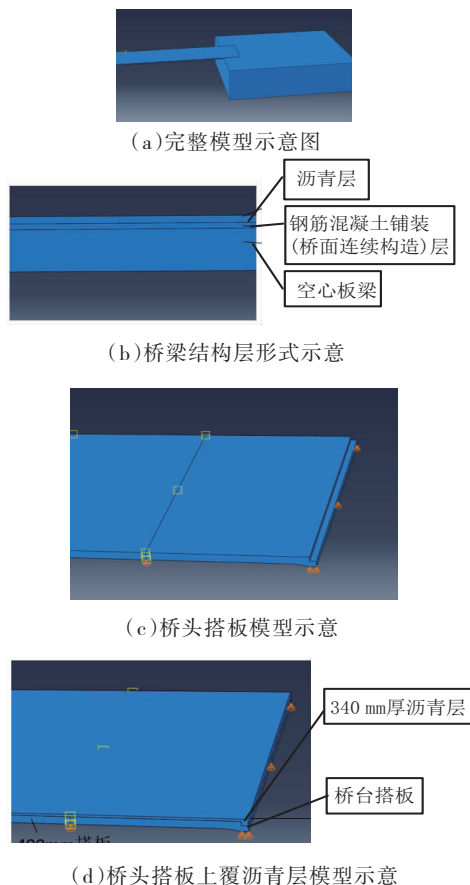


图2 完整模型及各结构层形式示意图

2.2 材料属性

桥梁的各层材料参数^[10-11]如表 1 所示,道路的各层材料参数如表 2 所示。由于层间接触的摩擦系数需要通过试验获取,因此本文参照占雪芳^[10]的试验结果设置摩擦系数,假定除了搭板与周围土体、地基与上层土体发生摩擦,其余各层包括沥青层、半刚性基层、碎石层、土基之间均不发生相对水平错动,故采用绑定约束;设置法向接触条件为“硬接触”、切向接触条件为“库伦摩擦”;仅有桥梁部分发生温度变化,产生的膨胀/收缩变形通过搭板传递到道路侧。此计算模型与实际情况相似。对无缝桥结构的变形影响最大的是桥头搭板的变形,因为无缝桥会产生整体位移,其横向裂缝主要集中在桥的一侧,而在另一侧的裂缝较小,故本文将其作为一个基本假定,一方面为贴近实际情况,另一方面也为起到简化计算的作用。

表 1 桥梁材料参数表

结构	材料类型	厚度 / m	密度 / (kN·m ⁻³)	弹性模量 / MPa	泊松比	线膨胀系数 / K ⁻¹
面层	沥青	0.1	2 100	1 400	0.35	8 × 10 ⁻⁴
桥面连续构造 / 混凝土铺装	混凝土	0.08	2 500	20 000	0.20	10 × 10 ⁻⁶
空心板梁	混凝土	0.90	2 500	32 500	0.20	10 × 10 ⁻⁶

表 2 道路材料参数表

结构	材料类型	厚度 / m	密度 / (kN·m ⁻³)	弹性模量 / MPa	泊松比	线膨胀系数 / K ⁻¹
面层	沥青	0.12	2 100	1 400	0.35	8 × 10 ⁻⁴
基层	水稳碎石	0.20	2 100	1 500	0.25	5 × 10 ⁻⁶
底基层	级配碎石	0.50	2 000	500	0.35	9 × 10 ⁻⁶
搭板	C30 混凝土	0.30	2 500	30 000	0.20	10 × 10 ⁻⁶
后置板	C30 混凝土	0.30	2 500	30 000	0.20	10 × 10 ⁻⁶
下承层	C20 混凝土	0.50	2 500	20 000	0.20	10 × 10 ⁻⁶
地基	土基	—	1 400	40	0.4	1.0 × 10 ⁻⁶

2.3 边界条件

在道路地基底部施加约束并完全固定;地基左侧与右侧施加 Y 方向(行车方向)的约束,前侧和后侧施加 X 方向(垂直于行车方向)的约束;桥梁左侧施加 X 与 Y 方向的约束;在桥梁底部为模拟桥墩的作用,施加两个支座处的 Z 方向(垂直于地面方向)约束;其他位置保持自由。对整个模型施加重力场,对地基施加地应力预定力场。

3 搭板力学响应分析

对既有桥梁进行无缝化改建的建设条件要求较特殊,即需最大程度利用已建结构,以满足施工期间的交通要求。针对此需求,对搭板尾部构造进行局部优化改建,设置 L 形槽口,并进行有限元模拟仿真,计算隐形缝区域的沥青路面由于温度变化而变化的力学特性。假定所有材料的力学性能都在线弹性范围内变化,且不考虑具体的施工过程(即不设置最小摊铺厚度)。

搭板尾部与地梁(路基过渡段)间缝隙上方的可伸缩钢盖板采用 Z 方向约束进行替代。由于搭板尾部 L 形槽口处为最不利位置,为模拟分析桥梁在 ± 15 ℃ 与 ± 25 ℃ 温度下对隐形缝区域的沥青路面的影响,模型对桥梁分别施加 0~15 ℃、15~-15 ℃ 与 0~25 ℃、25~-25 ℃ 的温度场,摩阻系数分别取 0.6 和 1.25,以得到隐形缝区域沥青路面在温度变化下的应力与应变情况。

温度场的选择参照了上海地区温度的变化,从桥梁施工完成至冬季,路面温度降低接近 25 ℃;而从冬季至夏季,路面温度上升接近 25 ℃;从冬季至春季,路面温度上升接近 15 ℃;从夏季至秋季,路面温度下降接近 15 ℃。这也符合本文对温度场逐渐变化的需求,故选取 ± 15 ℃、± 25 ℃ 为温度梯度。

搭板与其他层间的摩阻系数的变化对搭板应力会产生影响,摩阻系数增大,应力能更好地扩散,使应力分布更为均匀。此外,土壤的摩擦系数还会根据土壤的类型、含水量、颗粒大小等因素而有所不同,常见值为 0.6 左右,但具体数值取决于土壤的具体性质,例如粘土、沙土或混合土等。湿润的土壤通常具有较高的摩擦系数,而上海地区土壤普遍含水率较高,故摩阻系数也应较大。实际选取时,需要进行现场测试。

3.1 ± 15 ℃升降温环境下的沥青路面力学响应

3.1.1 0~15 ℃升温变化时有限元仿真

当摩阻系数取 0.6 时,对主梁施加 +15 ℃ 的温度场,通过有限元仿真计算得到:当主梁温度上升时,梁体膨胀挤压搭板,搭板推动周围土体向后移动,通过搭板将桥梁的应变、应力与变形传递至道路侧;桥头搭板沿行车方向的最大变形量为 7.228 mm,位于搭板尾部底层,EPS(Expanded Polystyrene)填料的厚度满足变形要求。搭板尾部的上部沥青层的最大变形量为 6.890 mm。

搭板及沥青台阶处侧面的变形量如图3所示,搭板尾部的上部沥青层变形平均值为6.87 mm,变形最大值与最小值相差0.2 mm,可认为裂缝宽度较小。裂缝宽度的重要影响因素包括搭板尾部的上部沥青层变形的最大值与最小值之差,且此值受到温度和摩阻系数影响。此外,裂缝宽度还受到其他因素影响,包括施工因素、养护因素、荷载因素和其他偶然因素。因此无缝桥两边都会出现裂缝,且宽度不同。

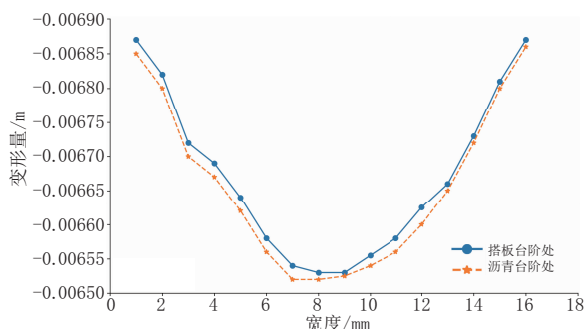


图3 搭板及沥青台阶处侧面变形量(单位:m)

相对搭板位移（即热拌沥青碎石侧面与搭板脱空的缝隙大小）为0.02 mm，升温下脱空情况较小。沥青层侧面的应力大小结果如图4所示，L型槽口上方沥青层的最大应力值为0.06 MPa。升温后搭板的最大压应力值为3.018 MPa，地梁上方沥青层的最大压应力值为0.202 MPa。

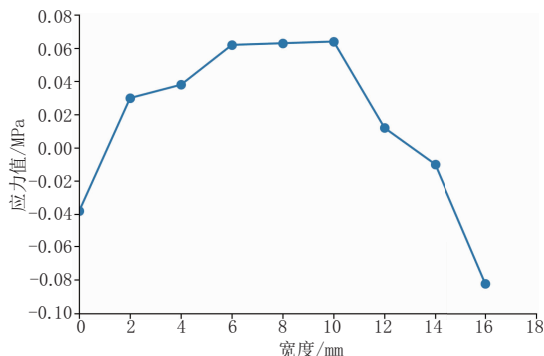


图4 沥青层侧面应力大小(单位:MPa)

将摩阻系数调整至1.25后，搭板及沥青层的相对位移量较小，脱空现象明显减少。台阶处的沥青层应力如图5所示，最大压应力为0.047 MPa，对比摩阻系数为0.6时的结果减小了0.01 MPa。摩阻系数为1.25的情况下，搭板的最大压应力值为3.010 MPa，地梁上方沥青层的最大压应力值为0.252 MPa。

3.1.2 15~-15℃降温变化时有限元仿真

摩阻系数取0.6时，对主梁施加15~-15℃的温度场，当主梁温度下降时，梁体收缩，搭板随之牵动，道路一侧此时也收到牵拉影响。桥头搭板沿行车方向的最大变形量为14.30 mm的收缩，位于搭板尾

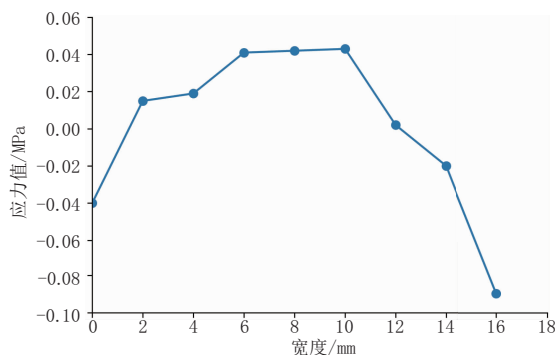


图5 沥青台阶处应力分布(单位:MPa)

部底层。在搭板尾部的上部沥青层的最大变形量为9.324 mm。搭板及沥青台阶处侧面的变形量结果如图6所示，搭板尾部的上部沥青层变形平均值为13.32 mm，变形最大值与最小值相差0.4 mm，可认为裂缝宽度较小。

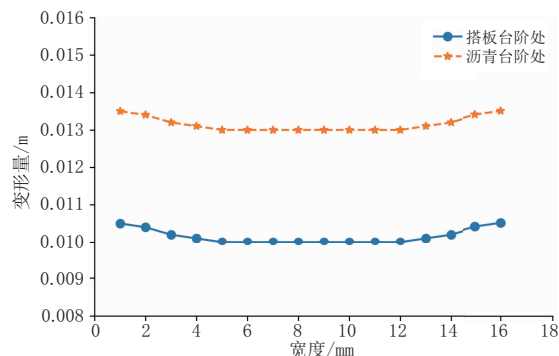


图6 搭板及沥青台阶处侧面变形量(单位:m)

相对搭板位移（即热拌沥青碎石侧面与搭板脱空的缝隙大小）3 mm，发生局部脱空的情况。沥青层侧面应力大小结果如图7所示，L型槽口上方沥青层的最大拉应力值为0.33 MPa。降温后，搭板的最大拉应力值为3.374 MPa，地梁上方沥青层的最大拉应力值为0.373 MPa。

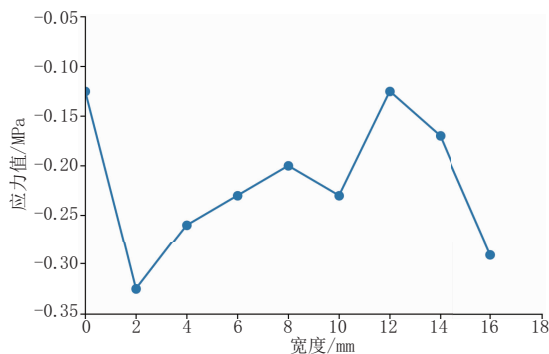


图7 沥青台阶处应力分布图(单位:MPa)

将摩阻系数调整至1.25后，搭板及沥青层的相对位移量较小，脱空现象明显减少。台阶处沥青层的应力分布如图8所示，最大压应力为0.35 MPa，对比摩阻系数为0.6时的结果增大了0.02 MPa。在摩阻系数为1.25的情况下，搭板的最大拉应力值为

3.361 MPa,地梁上方沥青层的最大拉应力值为 0.410 MPa。

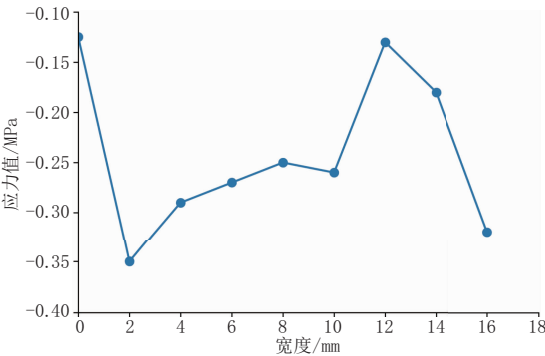


图 8 沥青台阶处应力分布(单位:MPa)

3.2 ± 25℃升降温环境下的沥青路面力学响应

3.2.1 0~25℃升温变化时有限元仿真

当摩阻系数取 0.6 时,对主梁施加 +25℃ 的温度场,通过有限元仿真计算得到:桥头搭板沿行车方向的最大变形量为 11.92 mm,位于搭板尾部底层,EPS 填料的厚度满足变形要求;搭板尾部的上部沥青层的最大变形量为 11.47 mm;搭板及沥青台阶处侧面的变形量结果如图 9 所示,搭板尾部的上部沥青层的变形平均值为 11.12 mm,变形最大值与最小值相差 0.4 mm,可认为裂缝宽度较小;相对搭板位移(即热拌沥青碎石侧面与搭板脱空的缝隙大小)为 0.02 mm,脱空情况较小;升温后,沥青层侧面的应力大小结果如图 10 所示,L 形槽口上方沥青层的最大压应力值为 0.03 MPa;升温后,搭板的最大压应力值为 3.018 MPa,地梁上方沥青层的最大压应力值为 0.202 MPa。

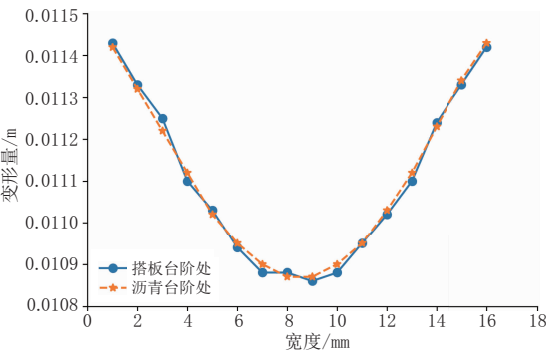


图 9 搭板及沥青台阶处侧面变形量(单位:m)

将摩阻系数调整至 1.25 后,搭板及沥青层的相对位移量较小,脱空现象明显减小。台阶处沥青层的应力分布如图 11 所示,最大压应力对比摩阻系数为 0.6 时的结果减小了 0.03 MPa。在摩阻系数为 1.25 的情况下,搭板的最大压应力值为 3.383 MPa,地梁上方沥青层的最大压应力值为 0.633 MPa。

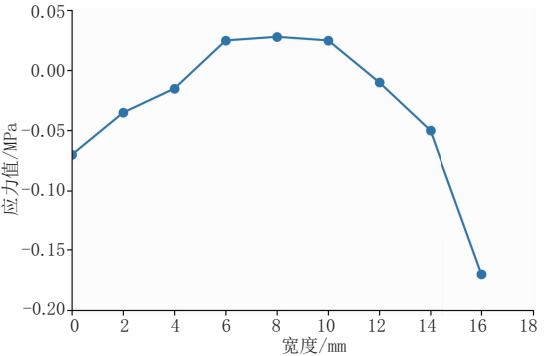


图 10 沥青层侧面应力大小(单位:MPa)

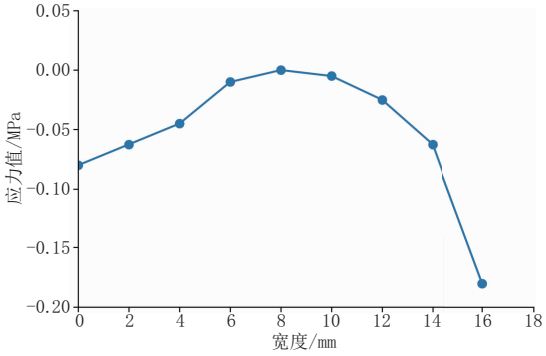


图 11 沥青台阶处应力分布(单位:MPa)

3.2.2 25℃到-25℃降温变化时有限元仿真

摩阻系数取 0.6 时,对主梁施加 25℃ ~ -25℃ 的温度场,通过有限元仿真计算得到,当主梁温度下降时,梁体收缩,搭板随之牵动,道路一侧此时也收到牵拉影响;桥头搭板沿行车方向的最大变形量为 23.76 mm 的收缩,位于搭板尾部的底层;搭板尾部的上部沥青层最大变形量为 15.79 mm;搭板及沥青台阶处侧面的变形量结果如图 12 所示,搭板尾部的上部沥青层的变形平均值为 18 mm,变形最大值与最小值相差 0.4 mm,可认为裂缝宽度较小。相对搭板位移(即热拌沥青碎石侧面与搭板脱空的缝隙大小)为 4.82 mm,脱空情况较小;沥青层侧面的应力大小结果如图 13 所示,L 形槽口上方沥青层的最大拉应力值为 0.43 MPa;降温后,搭板的最大拉应力值为 5.635 MPa,地梁上方沥青层的最大拉应力值为 0.576 MPa。

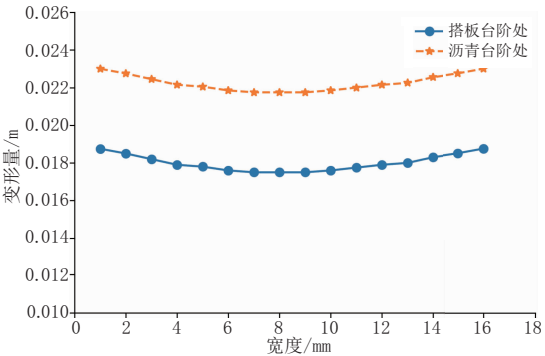


图 12 搭板及沥青台阶处侧面变形量(单位:m)

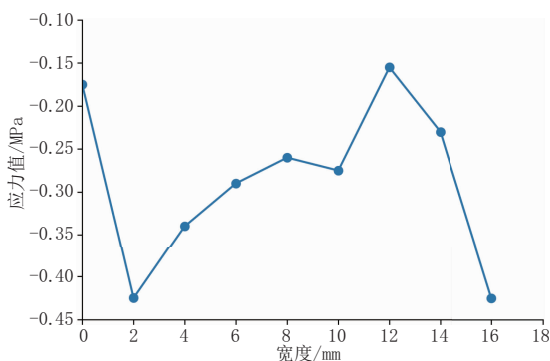


图13 沥青层侧面应力大小(单位:MPa)

将摩阻系数调整至 1.25 后,搭板及沥青层变形的相对位移量较小,脱空现象明显减小。台阶处沥青层的应力分布如图 14 所示,最大压应力为 0.5 MPa,对比摩阻系数为 0.6 时的结果增大了 0.06 MPa。摩阻系数为 1.25 的情况下,降温后搭板的最大拉应力值为 5.605 MPa,地梁上方沥青层的最大拉应力值为 0.674 MPa。

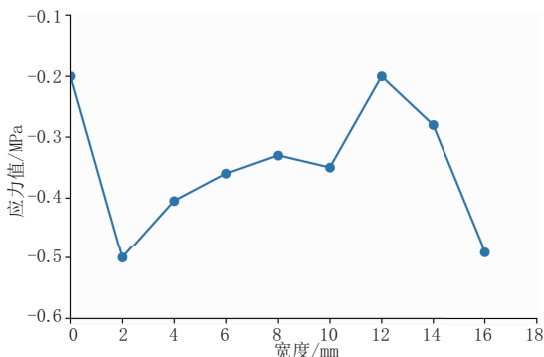


图14 沥青台阶处应力分布(单位:MPa)

3.3 实际施工降温环境的沥青路面力学响应

摩阻系数取 0.6 时,对主梁施加 30℃ ~ -5℃ 的温度场,通过有限元仿真计算得到:降温后,搭板及沥青台阶处的侧面变形量结果如图 15 所示,桥头搭板沿行车方向的变形平均值为 15.60 mm,最大位移位于搭板两侧;枕梁上部沥青层的变形平均值为 10.93 mm,变形最大值与最小值相差 0.06 mm,可认为裂缝宽度较小。相对搭板位移(即热拌沥青碎石侧面与搭板脱空的缝隙大小)为 4.67 mm,在此处发生局部脱空的现象;降温后,沥青层侧面的应力大小结果如图 16 所示,沥青层的平均应力值为 0.05 MPa,经分析是由于 L 形槽口处的热拌沥青碎石侧面与搭板发生脱空,致使所得拉应力较小;降温后,搭板的最大拉应力值为 3.972 MPa,地梁上方沥青层的最大拉应力值为 0.135 MPa。

将摩阻系数调整至 1.25 后,搭板及沥青层的相对位移量较小,相对搭板位移(即热拌沥青碎石侧面

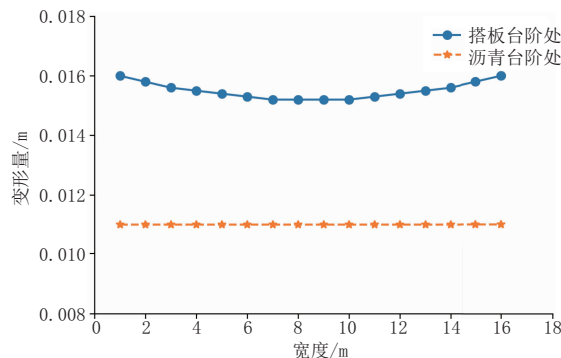


图15 搭板及沥青台阶处侧面变形量(单位:m)

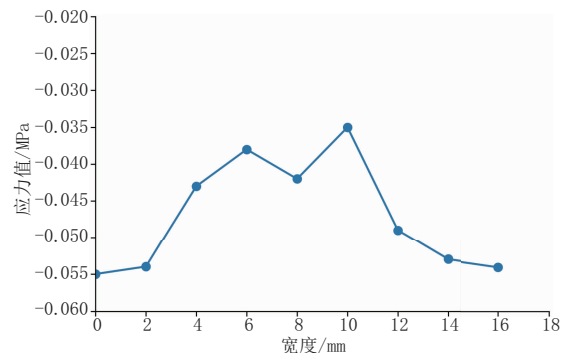


图16 沥青层侧面应力大小(单位:MPa)

与搭板脱空的缝隙大小)为 1.54 mm,脱空现象明显减少。台阶处沥青层的应力分布如图 17 所示,平均值为 0.41 MPa。摩阻系数为 1.25 的情况下,降温后,搭板的最大拉应力值为 5.687 MPa,地梁上方沥青层的最大拉应力值为 0.478 MPa。

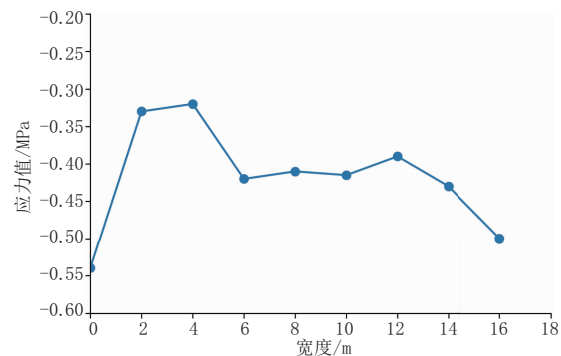


图17 沥青台阶处应力分布(单位:MPa)

4 结 语

本文研究了桥梁无缝化改建对接界沥青路面的受力影响,进行了有限元分析,并通过示范应用工程进行了验证。根据长期监测结果,得出了以下结论。

(1)无缝化改建后的中、小跨径桥梁,在施加了温度场以后,结构最容易产生较大变形的部位是桥头搭板处;而在沥青路面内部容易产生较大应力及变形的部位则是搭板尾部。

(2)升温 15℃ 时,桥头搭板沿行车方向的最大变形量为 7.228 mm,搭板尾部的上部沥青层的最大

变形量为 6.890 mm;当温度由 15 ℃降温至 -15 ℃时,搭板的最大收缩量为 14.30 mm,沥青层的最大变形量为 9.324 mm;升温 25 ℃时,搭板产生 11.92 mm 的位移,沥青层的最大变形量为 11.47 mm;当由 25 ℃降温至 -25 ℃时,搭板的最大收缩量为 23.76 mm,沥青层的最大变形量为 15.79 mm。

(3)主梁侧产生膨胀或收缩变形后,与主梁桥面连接的前侧桥面板会向后侧搭板传递位移,在搭板尾部台阶处产生较大的轴力;且由于台阶段仅有 200 mm 厚,沥青路面容易在此处产生应力集中从而造成破坏,后侧沥青路基也会因为厚度过薄而产生推移破坏。

(4)根据实际施工环境,对主梁施加 30 ~ -5 ℃ 的温度场,摩擦系数分别取 0.6 和 1.25 时,地梁上方沥青层产生的拉应力较小,最大值分别为 0.135、0.41 MPa,应力值越大,则裂缝更容易扩大;如果应力值超过了《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[11]对于材料的极限要求,则材料有破坏风险,在宏观上的表现之一是出现裂缝;在搭板 L 型台阶槽口处,热拌沥青碎石侧面与搭板局部脱空之间的缝隙较小,分别为 4.67、1.54 mm。由于实际应用工程接界范围采用了全厚沥青与铺设多层钢塑土工格栅等多项加强加韧措施,沥青层应力和脱空缝隙会比模型的仿真结果有所降低,并且在无缝化改建后,循环隐形缝范围路面的使用性能及耐久性良好,优于相接道路段,如图 18、图 19 所示。

参考文献:

- [1] 孟鑫.高速公路伸缩缝对桥头跳车的影响[J].黑龙江交通科技,2011,203(1):76-76,78.
- [2] 刘家齐.高速公路桥梁伸缩缝疲劳破坏机理分析及快速修复技术研究[D].郑州:郑州大学,2022.
- [3] 金晓勤,邵旭东.半整体式全无缝桥梁研究[J].土木工程学报,2009,42(9):68-73.



(a)改建前:路面有缝,易损、跳车



(b)改建后:路桥无缝衔接,舒适降噪、低维护、低影响

图 18 无缝化改建前、后,道路和环境品质同条件对比



(注:示范应用桥梁范围的路面状况优于相接道路)

图 19 监测及多次查勘:状态良好

- [4] 陈宝春,庄一舟,黄福云,等.无缝伸缩缝桥梁[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [5] 薛俊青,陈宝春,林健辉.空心板延伸桥面板桥温度胀缩变形研究[J].桥梁建设,2018,48(2):37-42.
- [6] 付鑫,樊争辉,庄一舟,等.无缝桥引板微型桩-土共同作用试验研究[J].福州大学学报(自然科学版),2017,45(2):179-184.
- [7] 宁高峰.公路桥头及桥梁伸缩缝处跳车原因及防治措施[J].山西建筑,2018(28):163-164.
- [8] Lin J, Briseghella B, Xue J, et al. Temperature monitoring and response of deck-extension side-by-side box girder bridges[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020,34(2):04019122.
- [9] 余佳欣,万卫红,相斌辉,等.中小跨径桥梁病害调查与损伤状态的快速识别方法研究[J].黑龙江交通科技,2023,356(10):64-68.
- [10] 占雪芳,邵旭东.全无缝桥延性性能试验研究[J].中外公路,2016,36(1):95-98.
- [11] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com