

高弹性应力吸收带疲劳试验及阻裂机理研究*

李德军¹, 罗少辉², 唐永红¹, 李强^{2,3}(1.湖南省岳阳市公路建设和养护中心, 湖南 岳阳 414000; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;
3.道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 接缝处设置应力吸收带是旧水泥砼路面“白改黑”工程延缓裂缝反射的重要措施。文中通过室内疲劳开裂模拟试验对比普通灌缝、高分子抗裂贴、高弹性应力吸收带 3 种防裂缝方案的抗裂性能, 并建立三维动态有限元模型分析室内模型结构的动态响应及阻裂机理。结果表明, 高弹性应力吸收带的平均阻裂率为 98.1%, 抗裂效果优于其他方案; 垂直于行车方向的沥青混合料层层底中截面横向最大主应力呈马鞍形分布, 且峰值随着抗裂措施的不同而显著降低; 抗裂贴以加筋作用为主, 适用于抵抗张拉型反射裂缝; 高弹性应力吸收带对剪切型及张拉型反射裂缝的抗裂效果显著。

关键词: 公路; 高弹应力吸收带; 疲劳试验; 阻裂机理; 反射裂缝

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)04-0092-05

反射裂缝是旧水泥砼路面加铺沥青路面后的主要病害之一, 其在加铺层层底萌生和扩展的主要原因是旧水泥砼路面接、裂缝处的应力局部效应。谈至明等从理论力学模型上证明了设置局部软弱夹层可有效防止因局部应力形成的张开型反射裂缝。为削弱和防止产生应力集中现象, 在阻裂夹层材料与方法上不断创新, 逐渐形成了全幅铺设和条带状铺设中间夹层两类处治方式。全幅铺设虽能控制随机产生的裂缝, 但经济性较差, 施工难度大, 施工质量难以保证。沿接、裂缝方向铺设的条带状层间防反射裂缝方式因其价格低廉、操作简单而得到推广应用。条带状铺设的防裂材料主要有高分子抗裂贴和高弹性橡胶玛蹄脂应力吸收带。目前对新型高弹性应力吸收带抗裂夹层材料的应用较少, 且对条带铺设整体性能评价局限于车辙试验获得的疲劳寿命, 缺乏该措施下应力扩散情况及抗裂机理分析。该文

结合实体工程, 采用新型高弹性体接缝填充材料(HZ/ZD-4 型)构成高弹性应力吸收带, 通过室内试验对比普通灌缝、高分子抗裂贴、高弹性应力吸收带的抗裂效果, 并建立三维有限元模型分析移动荷载作用下模型结构的动态响应及阻裂力学机理。

1 原材料

试验采用 AC-13C 沥青混合料, 其中集料采用石灰岩, 配合比见表 1。沥青采用 SBS 改性沥青, 油石比为 4.9%。经检测, 沥青混合料的技术指标满足规范要求。

高分子抗裂贴的技术指标见表 2。高弹性应力吸收带以聚合物弹性体材料为基材, 通过特殊施工工艺将 5 种功能材料组合形成高弹性体填充材料, 具有高弹性、强黏结性、柔韧性及阻裂性能, 技术指标见表 3。

表 1 沥青混合料集料级配

材料类型	用量/%	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
		16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1# (11~16 mm)	17	100	69.1	5.3	3.7	1.7	1.4	1.1	0.8	0.5	0.2
2# (6~11 mm)	38	100	100.0	81.3	3.6	1.3	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
3# (3~6 mm)	16	100	100.0	100.0	80.4	9.6	4.3	3.5	2.9	2.2	1.0
4# (0~3 mm)	26	100	100.0	100.0	99.8	89.1	66.9	46.8	34.9	22.2	8.4
矿粉	3	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.8	91.1	76.4
合成级配		100	94.7	76.8	43.8	28.5	21.7	16.2	12.9	9.2	4.9

* 基金项目: 湖南省岳阳市科学技术局科技计划项目(2019-3-10)

表2 高分子抗裂贴的技术指标

项目	指标值
厚度/mm	2
拉伸强度/ [N·(50 mm) ⁻¹]	纵向 ≥1 700 横向 ≥1 400
断裂延伸率/%	25~35
黏附性/(N·m ⁻¹)	≥4.0
耐热性/℃	165
低温柔性	-10℃未开裂
拉伸模量/MPa	200

表3 高弹性应力吸收带的技术指标

项目	指标值
厚度/mm	4
黏度(175℃)/(Pa·s)	3 900
低温性能	-10℃未开裂
弹性恢复/%	97
延伸率/%	115
高温性能	110℃时 30 min 不流淌
拉伸强度/N	400
黏结强度/MPa	0.25

2 室内模拟试验

2.1 试验方法

采用 DWT 双轮汉堡车辙仪,通过轮载的往返模拟原路面在行车荷载下反射裂缝的产生与扩展。为便于观察与量测不同抗裂处治措施下沥青砼加铺层反射裂缝扩展情况,对车辙仪的试模进行改进,将一侧钢板拆除,采用 F 型夹具固定试模及试件,保证百分表在试件侧面的安装与数值读取(见图 1)。



图1 车辙仪试模拆除及固定方法

2.2 室内试验模型结构

通过国内外疲劳开裂模拟试验装置和室内模拟试验的比较分析,发现在车辙轮载作用条件下板式支承试验模型观测到的是车辙破坏,很难观测到裂纹扩展开裂破坏,只有在简支支承条件下模型结构才呈现典型的裂纹扩展破坏。因此,室内模型试验

选用简支支承,试验方案见表 4,模型结构见图 2,橡胶垫块采用 3 cm 以改进车辙试验,满足模具高度。

表4 室内结构模型方案

试验方案	室内模型结构形式
A	麻石试件板+抗裂贴+AC-13C
B	麻石试件板+高弹性应力吸收带+AC-13C
C	麻石试件板+普通灌缝+AC-13C

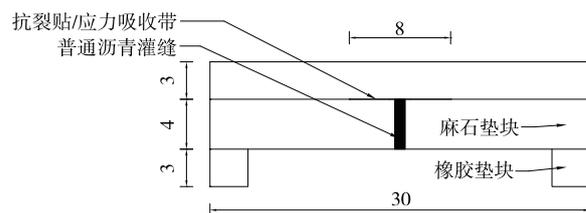


图2 简支支承条件下抗裂处治措施结构模型(单位:cm)

2.3 试样制备

车辙试件为静压法成型的 AC-13C 沥青混合料,压实度为 92%,尺寸为 30 cm×30 cm×3 cm。将满足要求的 AC-13C 试件黏结制成路面结构模型,步骤如下:1) 采用麻石切割加工成 30 cm×30 cm×4 cm 试块,并在中间切缝模拟 2 块水泥砼路面接缝;2) 将 3 种抗裂材料按照其施工工艺对麻石试块接、裂缝进行抗裂处理;3) 麻石试件涂抹 SBS 改性沥青黏层油,将其沥青车辙试件黏结组成抗裂结构模型,并在沥青混合料层预裂范围侧面涂白色涂料,以便从侧面观察和量测裂缝发展。

将成型试件、垫块及试模安装固定在汉堡车辙仪试验台上,车辙轮位于成型试件的中央,其滚动方向与试件裂缝方向垂直[见图 1(a)]。

2.4 试验参数

温度设定为室温(25±0.5)℃;试轮接地压强为(0.7±0.05) MPa;行走次数为(52±1)次/min;模拟旧水泥砼路面接缝的麻石预设裂缝宽度为 8 mm。

3 室内试验结果分析

3.1 抗疲劳性能

3 种抗裂材料室内模拟试验结果见表 5。由于高弹性应力吸收带抗裂措施试件在未出现明显裂缝时已发生严重车辙破坏,且试验轮载作用次数已远超其他抗裂方案,选择终止试验。

由表 5 可知:从产生初裂轮载作用次数来看,抗裂贴处治措施为普通灌缝的 2 倍,裂缝完全贯穿沥

表5 简支支承条件下疲劳试验结果

试验方案	初裂轮载作用次数/次		终裂轮载作用次数/次	
	试验值	平均值	试验值	平均值
抗裂贴	6 300		14 305	
	6 825	6 554	17 490	15 599
	6 537		15 001	
应力吸收带	—	—	(574 997)	—
	—	—	(574 997)	—
普通灌缝	4 200		8 634	
	4 709	3 979	9 882	8 429
	3 857		8 198	
	3 150		7 000	

青加铺层(终裂)时抗裂贴处治措施的轮载作用次数约为普通灌缝的1.85倍;从初裂到终裂的轮载作用次数来看,普通灌缝平均为4 450次,而抗裂贴处治措施平均为9 045次,后者为前者的2倍。说明在产生反射裂缝后,经抗裂贴处治后抗裂纹扩展能力强于普通灌缝;高弹性应力吸收带抗反射裂缝的效果强于抗裂贴。

3.2 反射裂缝扩展规律

裂纹扩展宽度采用百分表从沥青加铺层侧面量测,采用高清摄影机记录百分表读数,获取裂纹宽度与轮载作用次数的关系。抗裂贴和普通灌缝各取2个典型试件数据,绘制裂缝扩展宽度随轮载作用次数的扩展趋势图(见图3)。

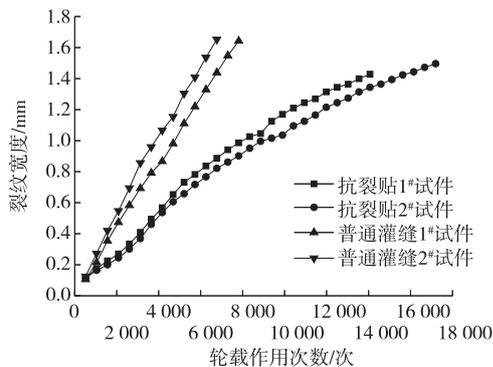


图3 裂缝扩展宽度随轮载作用次数扩展趋势

在轮载重复作用下旧路面接、裂缝处顶部材料劣化,在尖端应力效应下产生初始裂纹,并向沥青加铺层扩展。在这个过程中,裂缝处治材料抗裂性能的优劣影响裂纹扩展宽度和扩展速度。从图3可看出:普通灌缝处治方案的反射裂缝宽度随轮载作用次数的增加呈线性增大,抗裂贴处治方案的裂纹扩展速度相对较缓;裂纹完全贯穿沥青加铺层时,普通灌缝与抗裂贴措施下反射裂缝终裂宽度相差不大。

高弹性应力吸收带抗裂措施在试件出现严重车辙时,侧面未观测到明显裂纹扩展,百分表能量测到的2个试件的位移为0.030与0.035 mm。

以阻裂率CRR作为抗裂材料抵抗反射裂缝能力的评价指标,计算公式如下:

$$CRR = \frac{a_0 - a_{\max}}{a_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: a_0 为普通灌缝措施下裂纹终裂时最大宽度; a_{\max} 为其他抗裂措施下裂纹终裂时最大宽度。

根据室内模型试验中百分表量测结果,按式(1)计算得抗裂贴处治方案1[#]、2[#]试件的阻裂率分别为13.3%、9.2%,高弹性应力吸收带抗裂方案1[#]、2[#]试件的阻裂率分别为98.2%、97.9%。高弹性应力吸收带的阻裂效果远好于抗裂贴处治方案。

4 室内模型试验有限元分析

4.1 有限元模型

4.1.1 模型结构

为模拟移动荷载作用下路面结构受力状态,建立简支支承模型结构(见图4)。模型结构底部完全约束,顶部荷载作用面不作约束,与行车方向垂直面允许其竖向位移及转动。同时作以下假设:不考虑抗裂贴及应力吸收带材料阻尼现象,路面结构层材料为均质体,采用线弹性模型;沥青混合料层与旧水泥面层中间采用沥青黏结,界面连续且不发生层间相对滑移;水泥板与橡胶垫块界面之间相对滑移很小,采用small sliding接触分析。

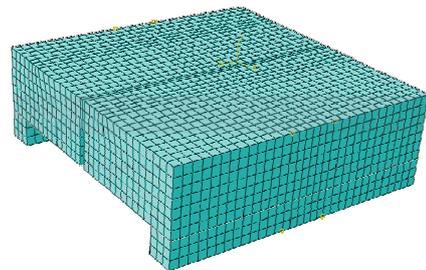


图4 模型结构网格划分

4.1.2 材料参数

通过模态分析获得结构频率响应,其中路面结构阻尼比为0.02~0.2,选取阻尼比0.05,其他参数见表6。

为实现阻裂材料对路面结构的加筋作用和黏结作用,不考虑其阻尼作用,分别采用拉伸模量及黏结强度对抗裂贴进行模拟,得拉伸模量为200 MPa、黏结强度为0.2 MPa,高弹性应力吸收带的弹性模量

表6 路面结构参数

路面结构	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ (kg·m ⁻³)	阻尼比
AC-13	1 250	0.25	2 400	0.05
旧水泥板	31 000	0.15	2 400	0.05

为 800 MPa。

4.1.3 移动荷载

黄仰贤在研究动态荷载作用时间问题时,采用式(2)所示荷载时间简化计算公式,得到荷载作用在沥青混合料层表面的时间约为 0.9 s。

$$T = 12 \frac{l}{v} \quad (2)$$

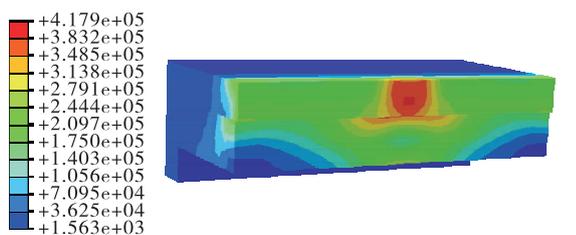
式中: T 为荷载作用时间(s); l 为车轮接触面积半径(cm); v 为车轮行驶速度(cm/s)。

移动荷载垂直裂纹方向,车轮接触面积为 5 cm × 2.2 cm。为实现移动荷载,在沥青混合料层表面设置荷载移动网格条带,每个网格长度、宽度均与车轮接触沥青面的宽度相同,共分为 10 个网格,每个阶跃时间荷载作用一个网格,通过 Visual Fortran 2013 编写用户子程序 vload 并关联 Visual Studio 2012,通过调用子程序完成移动荷载分布。

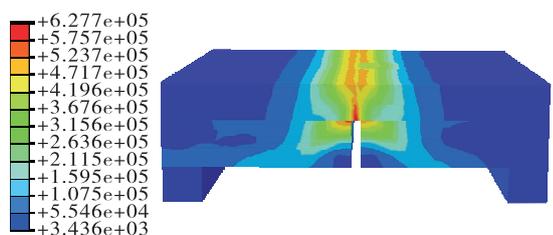
4.2 动态力学响应分析

4.2.1 应力云图

荷载是否实现移动可通过加铺层表面荷载作用时产生的荷载应力进行判别,随着时间变化,荷载作用位置不同,结构层内产生的应力变化也不同。图 5 为模型结构不同时间点及视图切片的 Mises 应力云图。



(a) 沿接缝方向视图切片Mises应力云图 ($t=0.45\text{ s}$)



(b) 偏载作用下接缝处Mises应力云图 ($t=0.35\text{ s}$)

图5 模型结构不同时间点及视图切片的 Mises 应力云图(单位:Pa)

从图 5 可看出:在移动荷载作用下,Mise 应力由裂纹中部逐渐向两端降低。根据网格划分判断荷载移动距离,阶跃时间为 0.45 s 时,移动荷载正好作用在旧水泥砼路面接缝上方,此时沥青混合料层层底及接缝两边的连接处出现明显应力集中现象;移动荷载逐渐驶离接缝正上方时,在荷载作用一侧的接缝顶端出现明显应力集中现象。说明不管荷载移动到哪个位置,接缝顶端处均会产生应力集中现象,此处也是初始裂纹产生的部位。

4.2.2 抗裂机理分析

随着加载的移动,旧水泥砼路面接缝上方沥青混合料层层底应力状态随着时间变化而变化。应力云图分析表明荷载作用在接缝正上方时,接缝处产生最大应力。因此,以接缝上方沥青混合料层层底部位作为分析对象,绘制移动荷载作用下沥青混合料层层底剪应力随时间变化曲线(见图 6)。

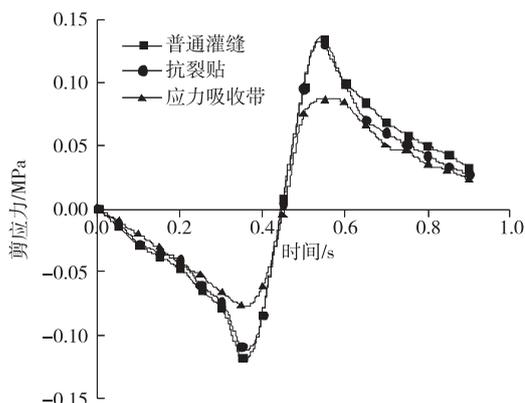


图6 沥青混合料层层底剪应力随时间变化曲线

从图 6 可看出:抗裂贴处治方案与普通灌缝方案的沥青混合料层剪应力变化曲线没有明显差异,而高弹性应力吸收带方案的剪应力减小幅度大于其他方案,峰值强度由 0.14 MPa 减少到 0.08 MPa,说明抗裂贴对剪应力的消散作用不显著。分析其原因,在剪切作用下抗裂贴抗反射裂缝的能力主要来自于抗裂贴与旧水泥砼路面的黏结力,黏结力强的抗裂贴在抗疲劳开裂性能上更优。而抗裂贴黏结力大小受材料黏结性能及施工工艺影响较大,施工前旧水泥砼路面接缝处界面处理不彻底、施工过程中加热滚压不到位都会严重影响抗裂贴的黏结力,从而影响抗裂贴的阻裂效果。采用高弹性应力吸收带抗裂方案,相当于在旧水泥砼路面接缝与沥青加铺层间设置一薄层柔软夹层将两者隔开,并起到弹性缓冲协调变形作用,从而大大降低荷载作用下剪切

作用的影响。

板式试件应力分布较复杂,板中每个方向都存在不同受力状态,图7为板中沿行车方向、垂直于行车方向不同抗裂方案下最大主应力分布情况。

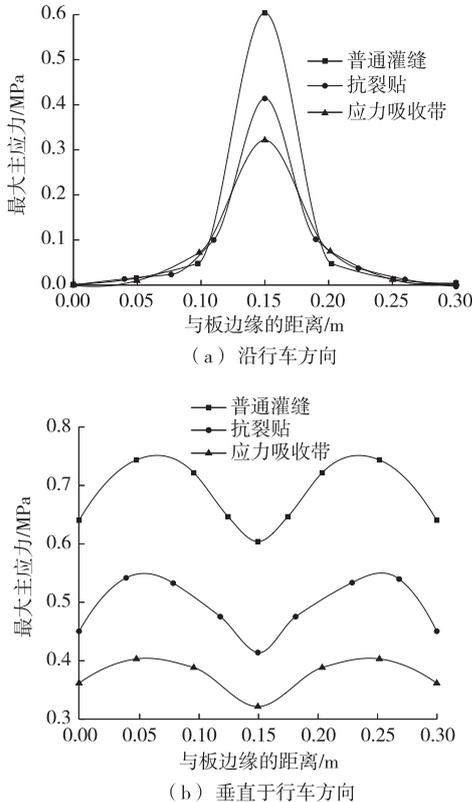


图7 沥青混合料层层底中截面横向应力变化($t=0.45$ s)

从图7可看出:1)荷载作用于板中时,沿行车方向最大主应力由板中迅速向两边减小。采用抗裂贴和高弹性应力吸收带处治方案,板中最大主应力由普通灌缝方案的0.60 MPa分别下降至0.41与0.32 MPa,但在距板中4~9 cm范围最大主应力略大于普通灌缝,且高弹性应力吸收带更显著。距板中4~9 cm范围是旧水泥砼、应力吸收带或抗裂贴、沥青混合料、黏层材料相互接触区域,材料交界部位会有尖端应力效应,同时抗裂贴和高弹性应力吸收带会进一步平缓板中部位的应力峰值。2)板式试件底部的最大主应力峰值并不在板中位置,而是出现在距板中两侧10 cm左右即4倍轮半宽位置。板底峰值最大主应力由普通灌缝的0.75 MPa降到抗裂贴的0.54 MPa和高弹性应力吸收带的0.40 MPa,且后两者的变化更平缓。

综合沥青混合料层底剪应力和层底中截面横向应力变化,抗裂贴抵抗反射裂缝主要以加筋作用为主,增强沥青混合料层层底水平抗变形能力,即垂直

于行车方向的加筋作用显著;高弹性应力吸收带对沥青混合料层底抗剪及抗拉均有明显改善作用,能显著提高沥青混合料加铺结构层的抗裂性能。

5 结论

(1)在3种旧水泥砼路面“白改黑”抗裂处治措施中,高弹性应力吸收带和抗裂贴的平均阻裂率分别为98.1%、11.3%,抗裂贴初裂和终裂轮载作用次数分别为普通灌缝的2倍、1.85倍,抗裂贴对接缝反射裂缝有一定延缓作用,高弹性应力吸收带抗裂效果最佳。

(2)抗裂贴与普通灌缝方案的接缝顶部沥青混合料层底剪应力变化曲线没有明显差异,而高弹性应力吸收带方案的剪应力减小幅度较明显;垂直于行车方向的沥青混合料层层底中截面横向最大主应力呈马鞍形分布,且峰值随着抗裂措施的不同而显著降低。

(3)抗裂贴主要以加筋作用为主,抵抗张拉型反射裂缝效果明显;高弹性应力吸收带兼具弹性夹层和抗裂贴的作用,抵抗剪切型及张拉型反射裂缝的效果显著。

参考文献:

- [1] 李文辉.应用土工织物防治复合式路面荷载型反射裂缝的试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [2] 胡小弟,王枝懿,周富杰,等.沥青混合料抗反射裂缝性能的快速评价方法[J].中外公路,2014,34(2):221-225.
- [3] 郭贺贺,沙海洋,仇云强,等.旧水泥路沥青加铺层反射裂缝影响区域分析及加固方法[J].中外公路,2018,38(4):49-53.
- [4] 谈至明,姜艺,郭林泉,等.沥青加铺层温度应力研究(Ⅲ):应力分析与局部处理[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(3):333-338.
- [5] 许黎,饶世洪.土工合成材料在沥青路面施工中的应用[J].交通节能与环保,2017,13(6):68-69.
- [6] 刘志胜,刘志岗,张脩,等.刚柔复合式路面裂缝反射预防技术研究进展[J].材料导报,2016,30(3):86-90+104.
- [7] 谈至明.路面张开型反射裂缝产生机理的力学分析[J].同济大学学报(自然科学版),1997,25(6):635-639.
- [8] 李汝凯,刘秘强,周刚,等.DZFH新型道路抗裂贴防反射裂缝性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(10):51-55.

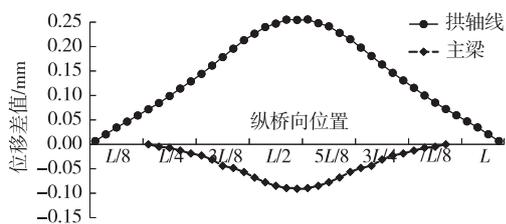


图 20 拱肋向内倾斜 2°时拱肋和主梁的位移变化

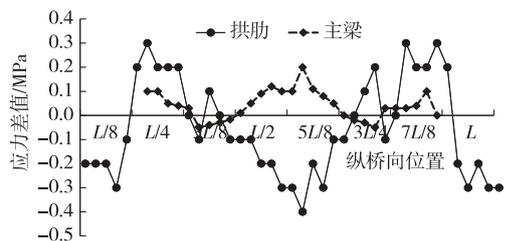


图 21 拱肋向外倾斜 2°时拱肋和主梁的应力变化

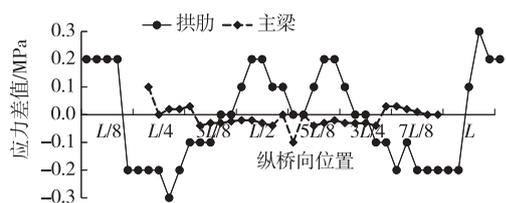


图 22 拱肋向内倾斜 2°时拱肋和主梁的应力变化

近主梁跨中的位移变化较大,拱肋外倾时拱顶和跨中的位移最大变化值分别为-0.35、0.10 mm,拱肋内倾时拱顶和跨中的位移最大变化值分别为 0.25、-0.10 mm。

由图 21 可知:拱肋外倾 2°时,拱肋各处的应力都发生不均匀变化,将导致拱肋发生更大角度倾斜,如不加以控制,会造成意外事故;但拱肋外倾 2°对主梁应力的影响不大,跨中处主梁应力变化最大,变化值为 0.2 MPa。

由图 22 可知:拱肋内倾 2°时,拱肋各处的应力均发生不均匀变化,但均在±0.3 MPa 范围内;对主梁应力的影响不大,跨中处主梁应力变化最大,变化值为-0.1 MPa。

4 结论

(1) 各项结构参数中,钢箱梁弹性模量及容重、

温度对拱肋和主梁结构的位移、应力影响最大;拱肋弹性模量及容重对拱肋和主梁结构位移、应力有一定影响;其余设计参数发生变化对拱肋和主梁应力的影响很小,几乎可忽略不计,不会造成结构破坏,但拱肋拱轴线和主梁位移产生了不同程度变化,其中拱肋侧倾对位移的影响最大。

(2) 桥梁结构位移和应力对钢箱梁弹性模量和容重变化的敏感性较高,对拱肋和主梁应力的影响较显著,施工中需对结构材料弹性模量和容重进行严格控制,尽量使其逼近设计理论值。

(3) 温度变化对拱肋应力及线形的影响明显,施工中应严格按照规范操作,保证温度处于 1 d 中较稳定的范围。

(4) 钢箱梁容重及弹性模量为主要设计参数,温度为第二主要设计参数,其余参数均会对拱肋和主梁位移、应力产生影响,吊杆容重为这些参数中的次要设计参数,其变化几乎不会对结构产生影响。

参考文献:

[1] 张治成.桥梁施工控制中的结构设计参数敏感性分析[J].武汉理工大学学报,2006,28(10):77-81.

[2] 冯仲仁,施孝基,陈百奔.独塔混合梁斜拉桥施工控制中的参数敏感性分析[J].世界桥梁,2017,45(6):18-23.

[3] 龙汉,刘剑.钢管混凝土系杆拱桥静力参数敏感性分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(2):419-425.

[4] 刘剑,王达.基于响应面法的大跨径斜拉桥静力参数敏感性分析[J].公路交通科技,2015,32(8):100-106.

[5] 马显红,余毅.高墩大跨连续刚构桥施工控制参数敏感性分析[J].桥梁建设,2012,42(3):57-62.

[6] WANG H,TAO T,ZHOU R,et al.Parameter sensitivity study on flutter stability of a long-span triple-tower suspension bridge[J].Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics,2014,128(5):12-21.

[7] 胡名忠,任瑞雪.220 m 主跨连续刚构桥设计参数敏感性分析[J].公路与汽运,2020(6):106-109.

收稿日期:2020-05-09

(上接第 96 页)

[9] 沈佳.应力吸收带抗反射裂缝试板疲劳试验研究[J].公路,2016(10):47-51.

[10] 白雪,贾秦龙.高速公路沥青路面病害分析及处治维修[J].筑路机械与施工机械化,2016,33(9):76-79.

[11] 黄仰贤.路面分析与设计[M].北京:人民交通出版社,

1998.

[12] 宿松亚,谢海巍,刘尊青,等.新型防裂基布应用于新疆公路养护工程的效果研究[J].公路与汽运,2021(2):87-89+92.

收稿日期:2021-02-05