

高分子抗裂贴抗裂性能研究及疲劳寿命预估*

罗少辉^{1,2}, 李强^{1,3}

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029;
3.道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 延缓裂缝反射是旧水泥砼路面“白改黑”工程中的重要问题之一。文中通过室内疲劳试验, 结合扩展有限元(XFEM)模拟动态裂纹扩展, 研究高分子抗裂贴的抗裂性能、裂纹扩展规律及力学阻裂机理, 预估加铺结构的疲劳寿命。结果表明, 高分子抗裂贴抗裂性能优秀, 其加筋作用对初裂后延缓裂纹扩展效果明显, 抵抗张拉型反射裂缝的效果优于剪切型; 普通灌缝与高分子抗裂贴的开裂曲线在初裂阶段存在略微差异; XFEM 模拟高分子抗裂贴时需将其模量折减到 1% 才能与实际开裂情况相符; 模拟结果与室内试验结果对比表明 XFEM 能有效模拟裂纹的动态扩展, 且能精确预估结构层疲劳寿命。

关键词: 公路; 高分子抗裂贴; 抗裂性能; 疲劳寿命; 扩展有限元(XFEM)

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)01-0087-05

旧水泥路面加铺沥青层后, 接裂缝处因应力局部效应发生塑性变形产生界面滑移而形成反射裂缝。一旦新路面表面出现反射裂缝, 水和碎屑将通过裂缝进入路面结构, 在车辆荷载作用下产生坑洞、麻面等病害, 降低路面耐久性, 缩短沥青面层的疲劳寿命。采用合理的抗反射技术措施是旧水泥砼路面加铺沥青面层成败的关键。高分子抗裂贴因施工简便, 在工程中得到大量应用并发挥出出色的抗裂、防水性能, 但目前还没有关于高分子抗裂贴抗裂性能的系统评价方法。孙慧等通过室内试验, 对不同宽度、拉伸速率等条件下高分子抗裂贴拉伸强度特性进行了研究; 李汝凯等采用室内试验模拟旧水泥路

面加铺实体工程, 对 DZFH 新型道路抗裂贴防治路面反射裂缝的效果进行了研究。该文通过改进车辙试验, 设计高分子抗裂贴室内试验模型分析其抗裂性能和裂纹扩展规律, 检测沥青层层底应变变化研究阻裂机理, 建立二维扩展有限元(XFEM)模型预估高分子抗裂贴的疲劳寿命。

1 原材料

1.1 沥青混合料

采用 SBS 改性沥青; 集料采用石灰岩, 其级配见表 1; 沥青混合料类型为 AC-13C, 油石比为 4.9%, 其技术指标满足规范要求。

表 1 沥青混合料的集料级配

粒径/mm	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
11~16	100	69.1	5.3	3.7	1.7	1.4	1.1	0.8	0.5	0.2
6~11	100	100.0	81.3	3.6	1.3	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
3~6	100	100.0	100.0	80.4	9.6	4.3	3.5	2.9	2.2	1.0
0~3	100	100.0	100.0	99.8	89.1	66.9	46.8	34.9	22.2	8.4
矿粉	100	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.8	91.1	76.4

1.2 高分子抗裂贴

高分子抗裂贴是由沥青基聚合物、胎基、高强度耐高温织物、隔离膜等经挤压形成的带状、具有自黏性的层间防裂、防水复合材料, 其技术指标见表 2。

2 室内试验模型

室内模型结构采用普通灌缝、高分子抗裂贴 2 种处治方式。通过试验支承方式对比发现简支支承

* 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 抗裂贴的技术性能指标

试验项目	试验值
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
耐热性/°C	165
低温柔性	-10 °C 未开裂
拉伸模量/MPa	200

可呈现典型的裂纹破坏形式,故模型采用简支支承(见图1)。

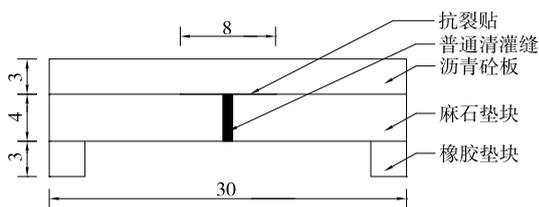


图1 简支支承条件下抗裂处治措施结构模型(单位:cm)

将满足要求的 AC-13C 试件黏结成路面结构模型,制作步骤:1) 将麻石切割加工成 30 cm×30 cm×4 cm 试块,并在中间切缝模拟 2 块水泥砼路面间的接裂缝;2) 采用高分子抗裂贴对试件接裂缝进行抗裂处理;3) 为得到行车方向上力学响应,将沥青车辙试件表面清理干净,然后在中心位置、离边缘 2 cm 处粘贴 3 个应变片(见图2),粘贴位置用无水乙醇涂抹清洗并用电吹风烘干;4) 麻石试件涂抹 SBS 改性石油沥青黏层油,将其沥青车辙试件黏结成抗裂结构模型,并在沥青混合料层预裂处侧面用白色涂料抹平坑槽缝隙以便观察裂缝发展。

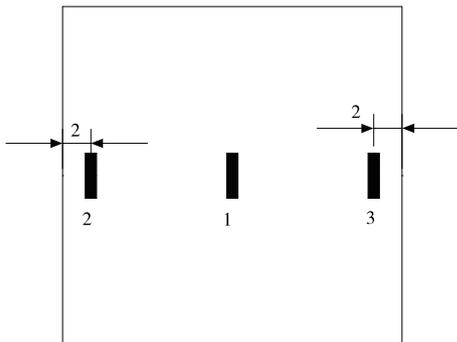


图2 车辙试件板底应变片粘贴位置(单位:cm)

将成型试件、垫块及试模安装固定在汉堡车辙仪的试验台上,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3)。



图3 试件结构装配示意图

3 室内试验结果分析

3.1 抗裂性能分析

疲劳寿命是评价抗裂处治措施抗裂性能最直观的指标。通过疲劳试验获得高分子抗裂贴及普通灌缝处治后结构疲劳寿命,结果见表3。

表3 简支支承条件下不同抗裂措施的疲劳试验结果

抗裂措施	轮载循环作用次数/次			
	初裂	平均值	终裂	平均值
抗裂贴	6 300		14 305	
	6 825	6 554	17 490	15 599
	6 537		15 001	
普通灌缝	4 200		8 634	
	4 709	3 979	9 882	8 429
	3 857		8 198	
	3 150		7 000	

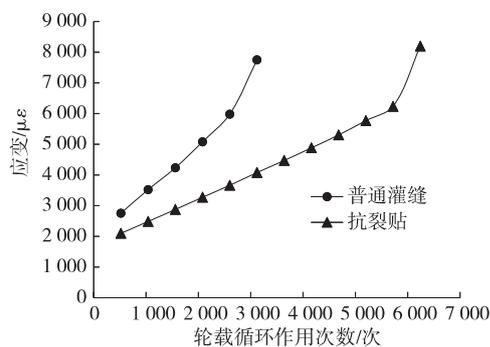
注:已剔除部分不合格试件。

从表3可以看出:1) 同一处治措施下不同试件的疲劳寿命存在差异,但在误差范围内。2) 经高分子抗裂贴处治后加铺结构的疲劳寿命得到很大提升,但高分子抗裂贴对初裂疲劳寿命的影响较小,达到初裂时轮载作用次数平均值与普通灌缝相差不多,仅为 2 575 次;在裂纹扩展阶段,高分子抗裂贴处治结构达到终裂时所需轮载作用次数明显高于普通灌缝,普通灌缝只需 8 429 次,而高分子抗裂贴需 15 599 次。说明高分子抗裂贴处治后加铺结构抵抗裂缝扩展的能力优于普通灌缝,同时高分子抗裂贴因其本身弹性变形对初裂疲劳寿命的影响较小。

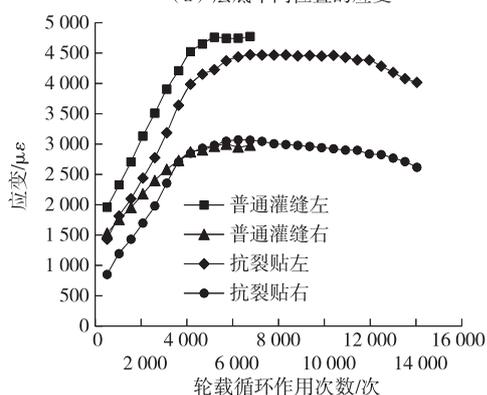
3.2 力学响应

通过检测沥青层层底中、左及右 3 个位置的应变变化,对高分子抗裂贴处治措施下结构力学阻裂机理进行分析,结果见图4。

从图4可以看出:1) 高分子抗裂贴与普通灌缝处治下 AC-13C 层层底拉应变变化趋势一致,均随着轮载作用次数的增加呈线性增长,且都出现明



(a) 层底中间位置的应变



(b) 层底左、右位置的应变

图 4 AC-13C 层层底中、左、右位置的应变变化

显的突变点即应力集中现象,此时 AC-13C 层层底在轮载作用下出现裂纹即初裂,与所观测到的初裂时间点基本吻合;高分子抗裂贴处治结构中应变增长缓慢,且数值低于普通灌缝,可在一定程度上消散层底应力,减弱旧路面接缝处的应力集中现象,延缓反射裂缝的产生。2) 由于荷载作用在接缝处形成较大剪切力,并向两边逐渐减小,AC-13C 层层底中部应变明显高于左、右应变;由于埋设左应变片一侧无侧限,左应变高于右应变。3) 应变变化第一阶段近似呈线性增长,高分子抗裂贴与普通灌缝的应变增长率差异不大(见表 4),主要是由于简支支承条件下受力为剪切力,与高分子抗裂贴施工工艺及黏结强度有关。经过线性变化后应变趋于平缓再有所下降。究其原因,一是材料在经过应变快速增长后期进入应变硬化阶段,要继续增大应变需增大荷载应力;二是由于反射裂缝贯穿整个沥青加铺层(终裂),应力在层底重新分布,造成应变变缓。试

表 4 不同抗裂措施下线性阶段应变增长率

抗裂措施	应变片位置	应变增长率/%
抗裂贴	左	70.5
	右	59.4
普通灌缝	左	74.7
	右	42.3

验后期沥青加铺层已出现车辙、裂缝加宽,同时下层麻石板产生分离,导致车辙板层底所受弯拉作用减弱,致使应变下降。

综上,高分子抗裂贴具有优异的抗拉伸能力与部分应力消减作用,对中间位置应变的消散作用大于两侧,可降低裂缝处应力集中现象,从而延缓开裂后反射裂缝的扩展。

3.3 裂纹扩展过程

裂纹在沥青混合料中的扩展路径十分复杂,并不是沿直线扩展。扩展有限元分析所计算的应变能释放率及应力强度因子为裂纹扩展垂直方向,为方便计算,取裂纹在竖向的投影长度作为 N (循环次数)- a (裂纹长度)曲线中的垂直长度。对高清相机的视频截图,每 19 min 记录一次裂纹长度(轮载作用次数 1 000 次),获取试验裂纹扩展长度与轮载作用次数的关系,绘制 $N-a$ 关系曲线(见图 5)。

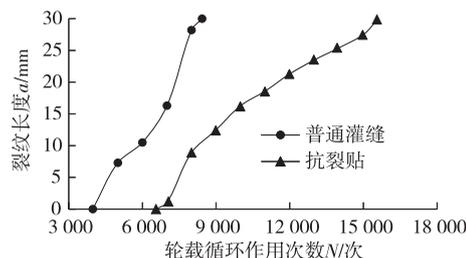


图 5 普通灌缝及抗裂贴处治措施下 $N-a$ 曲线

从图 5 可看出:在车辙疲劳试验条件下,高分子抗裂贴与普通灌缝处治下裂纹扩展趋势一致;高分子抗裂贴因初期抗拉伸作用强未产生塑性变形,在初裂后出现小段缓慢增长,有明显的阻裂行为;普通灌缝处治结构裂纹扩展速率高于高分子抗裂贴,裂纹扩展相同长度时,高分子抗裂贴所需轮载作用次数远高于普通灌缝,高分子抗裂贴结构疲劳寿命高于普通灌缝结构。

4 扩展有限元分析

4.1 疲劳分析基础

采用 ABAQUS 中 XFEM 破坏准则控制损伤的起始、损伤演化参数控制损伤的发展、损伤稳定性系数改善收敛,实现裂纹动态扩展。在 XFEM 中,以基于断裂力学理论中 J 积分作为应力强度因子的函数,通过 J 积分反映裂纹尖端应力应变场的强度即应变能释放率 G ,判断裂纹扩展长度和应力水平。

由 Paris 公式[见式(1)]可预测裂纹扩展。经过理论推导,在线弹性状态下 J 积分即为应变能释

放率 G , 可与应力强度因子进行转化。

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^n \quad (1)$$

在断裂力学中, 材料疲劳裂纹扩展规律一般服从 3 个阶段(见图 6): 1) 起裂低速扩展阶段。当沥青加铺层累计损伤达到 1, 即裂纹尖端处 G 达到 G_{thresh} 应变能释放率阈值时, 反射裂缝产生并将沿沥青加铺层向上扩展, 扩展迅速且出现在应力集中区域。该阶段末期逐渐放缓扩展速度, 转向扩展稳定期。2) 开裂稳定扩展阶段。稳定扩展阶段的时间占比在整个扩展过程中最大, 当裂纹扩展到沥青加铺层中间位置时, 继续保持裂纹扩展所需弯拉应力减小, 开裂保持稳定扩展, 直达到 G_{pl} 应变能释放率上限, 进入加速扩展期。3) 加速扩展阶段。经过前两阶段的扩展, 裂纹已扩展到沥青加铺层上部, 结构层经受的累计损伤导致疲劳加剧, 进入快速开裂阶段直到裂纹贯穿沥青加铺层, 导致沥青加铺层失去结构承载能力, G 达到 G_c 极限应变能释放率。

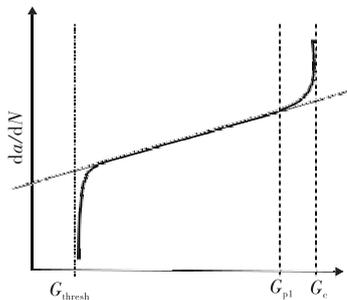


图 6 材料疲劳裂纹扩展示意图

在裂纹扩展曲线图中, 各参数满足以下关系:

$$\frac{G_{\text{thresh}}}{G_c} = 0.01; \frac{G_{\text{pl}}}{G_c} = 0.85 \quad (2)$$

在 XFEM 中采用变形后的 Paris 公式预测裂纹扩展规律:

$$N_0 = C_1 (\Delta G)^{C_2} \quad (3)$$

预测裂纹扩展第 1 阶段的疲劳寿命为:

$$\frac{da}{dN} = C_3 (\Delta G)^{C_4} \quad (4)$$

裂纹扩展到第 3 阶段所剩的疲劳寿命已很少, 几乎可忽略不计。

4.2 模型建立

为模拟室内试验裂纹扩展, 建立普通灌缝、高分子抗裂贴室内结构二维扩展有限元模型, 扩展有限元模型与室内模型的比例为 1:1(见图 7)。模型底部进行完全约束, 水平方向允许竖向位移及转动, 并

作以下假设: 加铺层底部预留 3 mm 裂纹; 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采用乳化沥青黏结, 将界面看成连续且不发生层间脱空现象; 断裂准则符合最大主应力准则, 开裂方向与最大主应力方向垂直。

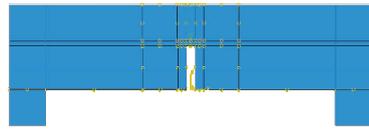


图 7 二维扩展有限元结构模型

扩展有限元模型面层采用 3 cm 厚 AC-13C, 旧水泥路面厚度为 4 cm, 以简支支座模拟土基同时代表旧水泥路面的脱空状态, 模型参数见表 5。高分子抗裂贴考虑其加筋作用及黏结作用, 拉伸模量取 200 MPa, 黏结强度取 0.2 MPa。

表 5 模型材料参数

构件	弹性模量/ MPa	泊松比	断裂能/ (J · m ⁻²)	疲劳极限/ MPa
AC-13C	1 250	0.25	300	0.105
旧水泥板	3 100	0.15	—	—
抗裂贴	200	0.25	—	—
支座	6.5	0.40	—	—

4.3 扩展有限元分析结果

通过设置正确的疲劳断裂参数, 对 2 种处治结构的裂纹扩展进行模拟, 实现裂纹在二维平面下动态扩展, 得到加铺层沥青混合料裂纹从 3 mm 扩展到 30 mm 时裂纹扩展长度 a 与轮载循环作用次数 N 之间的关系。在裂纹缩放系数为 4 的情况下, 2 种加铺结构扩展有限元局部应力见图 8、图 9。室内试验裂纹扩展结果与扩展有限元模拟计算结果对比

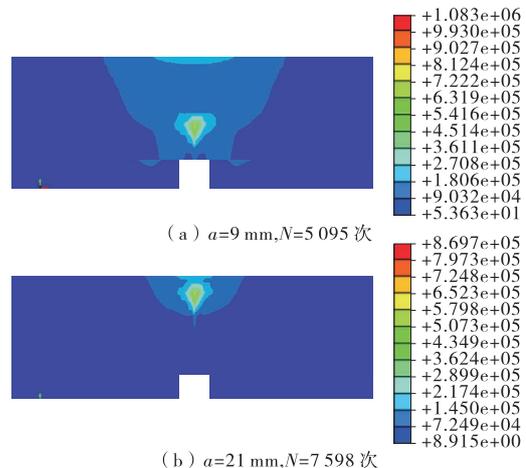


图 8 普通灌缝处治措施下加铺结构二维局部应力云图(单位: Pa)

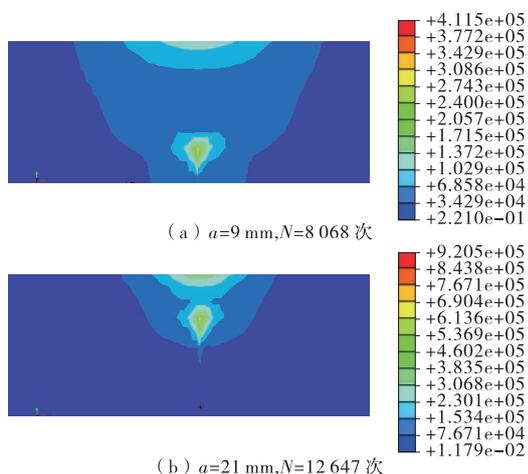


图 9 高分子抗裂贴处治措施下加铺结构二维局部应力云图(单位:Pa)

见图 10、图 11,试验值与模拟值的误差见表 6。

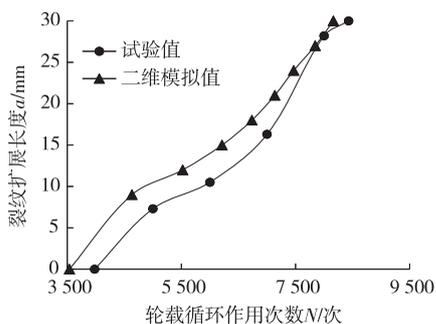


图 10 普通灌缝处治下室内试验结果与 XFEM 模拟结果对比

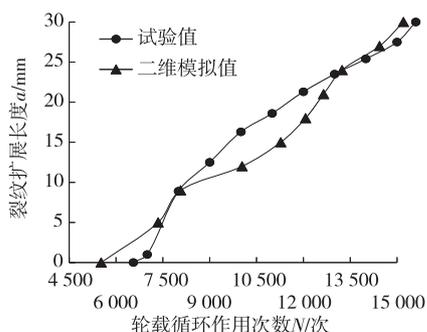


图 11 抗裂贴处治下室内试验结果与 XFEM 模拟结果对比

表 6 室内试验结果与 XFEM 模拟结果的误差

阻裂措施	开裂点	循环作用次数/次		误差/%
		试验值	模拟值	
普通灌缝	初裂	3 979	3 538	11.1
	终裂	8 429	8 163	3.2
抗裂贴	初裂	6 554	5 524	15.7
	终裂	15 599	15 204	2.5

从图 8、图 9 可看出:1) 随着裂纹的扩展,在裂纹尖端产生应力集中现象,说明裂纹尖端处应力场

比其他未产生裂纹部分的应力大得多,与理论计算结果一致。2) 高分子抗裂贴对旧水泥路面接缝的阻裂作用要求其具有较高的黏结强度和拉伸强度。对高分子抗裂贴开裂行为的模拟发现,嵌入约束可较好地模拟抗裂贴的加筋和黏结作用,但在采用嵌入约束模拟抗裂贴的加筋作用时不能只采用抗拉模量。实际应用中由于其未完全嵌入面层中,不能完全显示出其抗拉强度,需对模量进行折减。通过分析,得到将其模量折减到约 1%能与实际开裂情况相符。

由图 10、图 11、表 6 可知:对普通灌缝和高分子抗裂贴处治结构进行二维 XFEM 模拟,初裂及终裂轮载作用次数与试验值基本一致,采用 XFEM 可准确模拟旧加铺路面反射裂纹的扩展,并对抗裂措施下加铺结构的疲劳寿命进行预测。

5 结论

(1) 高分子抗裂贴由于加筋和应力消散作用,可提高加铺结构的疲劳寿命,其中加筋作用主要体现在结构初裂后延缓反射裂纹扩展,在抗裂贴加筋作用宽度范围内弯拉应力消散明显,对两侧应力消散作用较弱。

(2) 高分子抗裂贴及普通灌缝处治结构中,加铺层层底应变变化趋势基本一致,因沥青混合料发生应变硬化及终裂后应力重分布,加铺层层底所受弯拉作用减弱,沥青层层底左、右两侧应变经过线性变化后趋于平缓再有所下降。

(3) 普通灌缝和高分子抗裂贴处治结构的开裂曲线在初裂阶段存在略微差异,XFEM 模拟高分子抗裂贴时需对其模量进行折减,折减到 1%能与实际开裂情况相符。

(4) XFEM 设置合理的断裂参数,能实现裂纹的动态扩展,有效模拟裂纹的动态扩展、预估加铺结构的疲劳寿命。

参考文献:

[1] 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.

[2] 谈至,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.

[3] 李峰,李霞.高分子抗裂贴的应用现状和未来发展[J].

表8 桥墩刚度设计允许值

项目	轨道交通桥梁	铁路桥梁
横桥向刚度	$\leq 4\sqrt{L}, L \geq 5 \text{ m}$ 水平折角 $\leq 2.5\% \text{ rad}, L < 5 \text{ m}$	1.0‰rad, 200 km/h 公路及以上铁路桥梁 160 km/h 公路及以下铁路桥梁
顺桥向刚度	$\leq 5\sqrt{L}, L \geq 25 \text{ m}$ $\leq 25, L < 5 \text{ m}$	$\leq 5\sqrt{L}$, 简支梁, $L \geq 24 \text{ m}$ $\leq 24.5 \text{ kN/m}$, 简支梁, $L < 24 \text{ m}$

桥梁的差异。

3.4 关键构件损伤指标

在调查表意见栏,10位专家一致建议(4位10分,6位7分)轨道交通桥梁关键检测指标应考虑钢梁疲劳损伤。中国城市轨道交通服役期桥梁钢桥占比大,而且后续会逐年增加,发生疲劳破坏的基数较大;另一方面,钢梁的疲劳破坏为脆性破坏,无明显塑性变形,难以在破坏前采取有效预防措施,而一旦发生疲劳破坏,将造成巨大人员伤亡事故。因此,城市轨道交通桥梁和铁路桥梁规范均对钢结构主梁有严格要求。对于服役期钢桥,铁路桥梁检测规范通过疲劳应力截止限检验、疲劳损伤度检验及运营应力谱进行疲劳损伤检测。而轨道交通桥梁尚未提及,应在公路、市政桥梁关于钢结构桥梁检测评定指标的基础上,参照铁路桥梁检测规范,对轨道交通钢结构桥梁进行疲劳损伤检测判定。

4 结语

通过德尔菲法构建轨道交通桥梁关键检测指标,收敛性较好,专家认可度较一致,可为轨道交通桥梁检测评定提供借鉴。对轨道交通桥梁进行检测评定时,应在公路、市政桥梁检测规范的基础上,将上部结构姿态变化、边界条件变化、关键构件振动、关键构件损伤纳入检测评定范围。

该文仅研究了轨道交通桥梁的关键检测指标,各指标的具体取值还需结合设计标准和运营实际进一步研究。

参考文献:

[1] 中华人民共和国铁道部.铁路桥梁检定规范:铁运涵

(上接第91页)

企业导报,2011(12):284.

[4] 孙慧,刘军,童军.高分子抗裂贴拉伸强度特性试验研究[J].长江科学院院报,2017,34(2):5-7.

[5] 李汝凯,刘秘强,周刚,等.DZFH新型道路抗裂贴反射裂缝性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学

[2004]120号[S].北京:中国铁道出版社,2004.

[2] 交通运输部公路科学研究院.公路桥梁技术状况评定标准:JTG/T H21-2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

[3] 北京市政路桥管理养护集团有限公司,振华集团(昆山)建设工程有限公司.城市桥梁养护技术标准:CJJ 99-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.

[4] 王维康.基于层次分析法和模糊理论的矮塔斜拉桥状态综合评估[D].西安:长安大学,2014.

[5] 郭秀华.实用医学调查分析技术[M].北京:人民军医出版社,2005.

[6] 魏亚辉.高速铁路无砟轨道桥梁梁端变形相关问题研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2012.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通桥梁设计规范:GB/T 51234-2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[8] 宁星.地面沉降下无砟轨道的力学特性研究[D].北京:北京交通大学,2014.

[9] 申磊.梁端无砟轨道扣件系统受力研究[D].成都:西南交通大学,2008.

[10] 吴定俊,曹雪琴,许恺.上海地区铁路桥梁基础沉降和高速铁路桥式性能比较[J].上海铁道大学学报(自然科学版),1997,18(4):17-23.

[11] 汪振国.轨道交通简支梁桥振动特性与控制研究[D].上海:华东交通大学,2018.

[12] 国家铁路局.铁路桥涵设计规范:TB 10002-2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.

[13] 周细辉,黄坤.钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹扩展特性及加固方法研究[J].中外公路,2019,39(3):138-142.

收稿日期:2021-06-25

版),2017,36(10):51-55.

[6] 蔡氧,付伟,陶泽峰,等.基于扩展有限元模型的土工布防荷载型反射裂缝影响分析[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(3):765-770.

收稿日期:2021-02-28