

DOI: 10.12164/j.issn.1003-8965.2022.02.019

裂缝修补组合结构弯曲拉伸试验研究

Study on bending tensile test of crack repair composite structure

池漪¹, 庞绮玲²

(1.湖南交通职业技术学院, 湖南 长沙 4101322; 2.佛山市自然资源局三水分局, 广东 佛山 528100)

CHI Yi¹, PANG Qiling²

(1. Hunan Communications Vocational and Technical College, Changsha 4101322;

2. Sanshui Branch of Foshan Natural Resources Bureau, Foshan 528100)

摘要: 针对沥青路面低温开裂及裂缝修补等问题, 通过弯曲拉伸试验比较沥青混凝土原状试件和裂缝修补组合结构在不同温度下的弯拉强度、破坏弯拉应变和破坏弯曲刚度模量, 结合应力应变曲线分析, 计算单位体积破坏能, 进而检验和评价裂缝修补组合结构的低温抗裂性能。结果发现, 弯曲拉伸试验能较好检验裂缝修补组合结构的低温抗裂性能, 通过单位体积破坏能可综合评价裂缝修补组合结构的低温抗裂性能, 从而指导优化修补材料与修补工艺。

关键词: 裂缝修补; 组合结构; 弯曲拉伸试验; 低温抗裂性能

Abstract: Aiming at the related problems of low-temperature cracking and crack repair of asphalt pavement, the flexural tensile strength, failure flexural tensile strain and failure flexural stiffness modulus of asphalt concrete undisturbed specimen and crack repair composite structure at different temperatures are compared through flexural tensile test. Combined with the analysis of stress-strain curve, the failure energy per unit volume is calculated, then the low temperature crack resistance of crack repair composite structure is tested and evaluated. The results show that the flexural tensile test can better test low-temperature crack resistance of the crack repair composite structure and evaluate its low-temperature crack resistance by the failure energy per unit volume, so as to guide the optimization of repair materials and technology.

Key words: crack repair; composite structure; bending tensile test; low temperature crack resistance

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1003-8965(2022)02-0070-06

0 引言

低温开裂是沥青路面的主要病害, 容易诱发严重次生病害, 导致道路发生结构性破坏, 是一个世界性难题^[1]。随着温度的变化, 沥青混凝土的力学性能表现非常复杂。研究沥青混凝土裂缝修补组合结构的低温开裂性能对避免沥青路面进一步劣化、确保裂缝修补效果、提高沥青路面养护维修效率等都有重要意义。

目前, 国内常用弯曲拉伸试验进行沥青混凝土低温抗裂性能的评价。裂缝修补组合结构也可以通过修补后的小梁进行弯曲拉伸试验, 来测试裂缝修补组合结构的弯拉强度、破坏弯拉应变和破坏弯曲刚度模量, 还可以结合应力应变曲线分析, 计算单位体积破坏能, 进而检验和评价裂缝修补组合结构的低温抗裂性能。

1 弯曲拉伸试验方法

按照JTG E20-2019《公路工程沥青及沥青混合料试验

规程》, 将车辙板切割小梁试件(250×30×35mm); 在带环境保温箱的微机控制沥青混合料试验系统上进行试验, 设置试验温度为0℃、5℃、10℃、15℃、20℃、25℃, 加载速率为50mm/min。先测试规定温度下修补前小梁试件弯曲拉伸强度、最大拉伸变形和弯曲刚度模量; 然后控制缝宽为5mm, 将预先断裂的小梁试件进行修补, 再进行弯曲拉伸试验(见图1), 测试裂缝修补组合结构的弯曲拉伸强度、最大拉伸变形和弯曲刚度模量, 与原状试件的结果进行不同温度下的数据对比, 结合试件的破坏形态, 综合评价组合结构的修补效果和低温抗裂性能^[2]。

裂缝修补组合结构试件制作: 对已断裂试件进行修补, 根据路面裂缝调查结果, 选取典型的缝宽5mm作为模拟缝宽。如图2所示, 通过卡尺调整平均裂缝宽度为5mm, 采用密封胶和夹具固定缝槽, 并将其三面密封; 配制裂缝修补材料, 将其均匀灌入缝槽中, 修补材料固化后方可卸除夹具。

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目“无砟轨道混凝土裂缝修补结构相容性研究”(18C1421)

作者简介: 1) 池漪(1981-), 女, 湖北人, 副教授, 路桥专业带头人, 现从事土木工程结构与材料研究工作; 2) 庞绮玲(1987-), 女, 广东人, 硕士, 现从事土木工程材料研究工作。

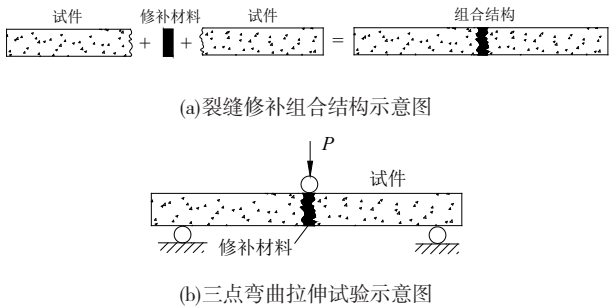


图1 组合结构试件制作和弯曲拉伸试验
Fig.1 Preparation and bending tensile test of combined structural specimen



图2 组合结构体系弯拉试验
Fig.2 Bending tensile test of combined structure

修补前小梁和裂缝修补组合小梁的抗弯拉强度、破坏时的最大弯拉变形和劲度模量的计算如式(1)~式(3):

$$R_B = \frac{3LP_B}{2bh^2} \tag{1}$$

$$\varepsilon_B = \frac{6hd}{L^2} \tag{2}$$

$$S_B = \frac{R_B}{\varepsilon_B} \tag{3}$$

式中:

- R_B —破坏时的抗弯拉强度;
- ε_B —破坏时的最大弯曲应变;
- S_B —破坏时的弯曲劲度模量;
- P_B —破坏时的最大荷载;
- b —跨中断面的宽度;
- h —跨中断面的高度;
- L —跨径;
- d —破坏时的跨中挠度。

2 弯曲拉伸试验结果分析

各温度下修补前后小梁弯曲拉伸试验结果见表1。

表1 各温度下修补前后小梁弯曲拉伸试验结果
Tab.1 Results of bending tensile test of trabecular before and after repairing

试验温度 (℃)	试件类型	弯拉强度 (MPa)	强度比 (%)	弯拉应变 ($\varepsilon \times 10^{-3}$)	应变比 (%)	弯曲劲度模量 (MPa)	模量比 (%)
0	修补前	11.7	96.6	3.5	111.4	3316.1	86.9
	修补后	11.3		3.9		2882.4	
5	修补前	11.0	79.1	5.6	94.6	1959.3	89.3
	修补后	8.7		5.3		1749.6	
10	修补前	8.8	72.7	13.4	178.4	607.3	73.1
	修补后	6.4		23.9		243.7	
15	修补前	7.9	70.9	14.1	59.6	570.9	113.3
	修补后	5.6		8.4		646.7	
20	修补前	6.3	52.4	15.1	66.9	516.7	78.3
	修补后	3.3		10.1		304.4	
25	修补前	3.8	52.6	26.7	56.2	142.3	93.4
	修补后	2.0		15.0		132.9	

注: 强度比=修补后试件弯拉强度/修补前弯拉强度; 应变比=修补后试件弯拉应变/修补前弯拉应变; 模量比=修补后试件弯曲劲度模量/修补前弯曲劲度模量

2.1 弯拉强度

从图3可以看到, 无论是修补前小梁试件还是裂缝修补组合结构试件, 温度对其弯拉强度的影响是一致的, 均随温度的升高而降低。从表1可知, 裂缝修补组合结构试件的弯拉强度低于修补前的小梁试件, 且强度比也随温度的升高而降低, 从96.6%降至52.6%。由此可以看出, 裂缝修补组合结构试件在低温时修补粘结效果较好, 低温时修补材料与沥青混凝土基体抗弯拉相容性较好。这可能是因为沥青混凝土在低温条件下呈弹性体, 有较高的强度, 与修补材料的力学性能相近, 粘结较好。而高温时, 由于沥青与石料之间的粘结力下降, 容易发生蠕变, 易在粘结界面产生断裂, 且随着温度升高, 沥青混凝土基体与修补材料的力学性能差异逐渐凸显, 因此抗弯拉强度较差。弯曲拉伸试验主要评价低温抗裂性能, 可以得出裂缝修补组合结构体系的低温抗裂性能较好。

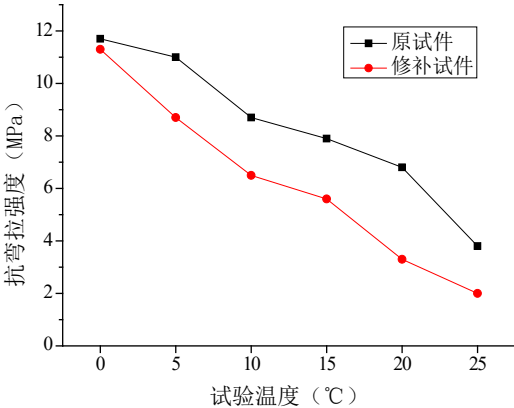


图3 抗弯拉强度-温度曲线
Fig.3 Bending tensile strength-temperature curve

2.2 最大弯拉应变

从图4可以看到,随着温度的上升,修补前试件弯拉应变逐渐增大,而裂缝修补组合结构则随着温度升高先增加,在10℃时出现峰值 23.9×10^{-3} ,后下降,再又缓慢增加。从表1可知,在各温度下(0~25℃)裂缝修补组合结构最大弯拉应变均满足JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》要求。在0~10℃时,应变比处于较高水平,说明此温度区间内裂缝修补组合结构协调变形能力较强,力学相容性较好。这可能是由于修补材料的弹性模量(1800MPa)与沥青混凝土低温时的弹性模量接近,且修补材料粘结性较好。

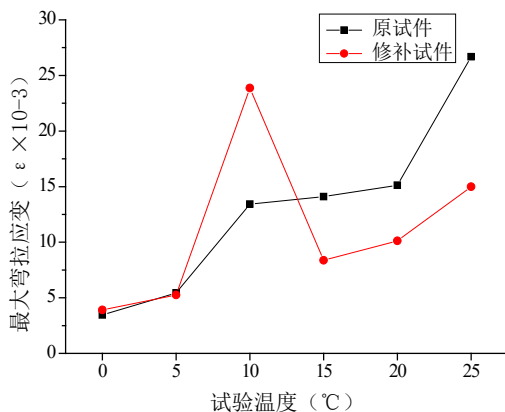


图4 最大弯拉应变-温度曲线

Fig.4 Maximum bending strain-temperature curve

2.3 弯曲劲度模量

从图5可见,无论是修补前小梁试件还是裂缝修补组合结构试件,温度对其弯曲劲度模量的影响是一致的,均随温度升高而降低。从表1可知,除15℃外,裂缝修补组合结构试件的弯曲劲度模量均低于修补前试件。强度比先随温度升高而降低,在15℃时出现峰值113.3%,后又缓慢下降。

综上,裂缝修补组合结构在修补前后的弯曲拉伸强度、弯拉应变和弯曲劲度模量数据的变化规律基本一致。裂缝修补组合结构在低温条件(0~15℃)下的弯曲抗裂能力较好,修补粘结效果较好,修补材料与沥青混凝土基体共同抵抗荷载,协调变形能力较好,因而力学相容性较好。超过15℃后,裂缝修补组合结构的力学相容性不足,需进一步优化修补材料与修补工艺。

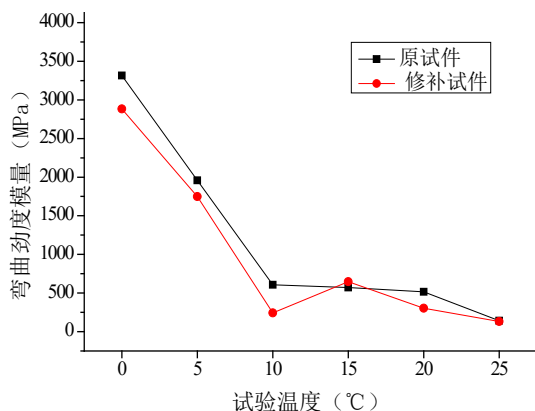


图5 弯曲劲度模量-温度曲线

Fig.5 Bending momentum modulus-temperature curve

2.4 单位体积破坏能

雷瑞(Reiner)指出,混凝土的破坏包括超过某一“强度”和超过某一“变形”引起的破坏^[3]。针对低温抗裂性能,单独采用弯拉强度或弯拉应变作为其评价指标具有局限性,而能量法可以综合这两项指标,因此,采用单位体积破坏能对裂缝修补组合结构体系进行进一步研究。

破坏能指混凝土在破坏时消耗的能量,消耗的能量越大,说明其低温抗裂性能越好。根据混凝土破坏能的定义,通过弯曲拉伸试验的应力应变曲线,计算弯拉应力峰值曲线与X轴围成的面积,即为破坏能,见式(4)和图6。

$$W_f = \int_0^{\varepsilon_c} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4)$$

式中:

W_f —破坏能;

ε_c —最大弯拉应变。

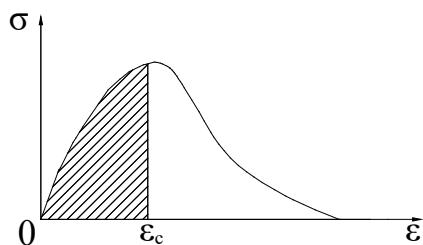


图6 破坏能计算示意图

Fig.6 Schematic diagram of the destructive energy calculation

2.4.1 应力应变曲线

图7为各温度下弯曲拉伸试验的应力应变曲线,反映了在荷载作用下沥青混凝土基体和修补材料共同承受荷载和协调变形的能力。

由图7可以看出,在0℃和5℃时,修补组合体系和原状试件的应力应变曲线前段呈线性关系,接近峰值时呈微小曲线,达到峰值能保持极短时间后破坏,是介于脆性破坏和柔性破坏之间的曲线。裂缝修补组合结构和原状试件曲线接近,承受荷载能力和协调变形较一致,反映其修补粘结效果较好;在10℃时,曲线出现了分离,但偏离不大,修补组合体系曲线更平缓,应力峰值不如原状试件,但是最大弯拉应变较原状试件大,可见修补材料与沥青混凝土基体粘结效果较好,荷载作用下有更好的协调变形能力,修补后的组合体系抗变形能力提高;在15~25℃时,应力应变曲线呈抛物线,属于柔性破坏,裂缝修补组合结构应力应变曲线与原状试件曲线偏离较大,裂缝修补组合结构应力峰值及最大弯拉应变均比原状试件小,承受荷载和协调变形能力不如低温条件。这可能是因为沥青混凝土基体强度随温度上升而降低,在荷载作用下,粘结面沥青呈粘性,出现流动滑移,而修补材料属于反应型材料,虽然有一定的拉伸变形能力,但不能随流动的沥青移动,两者间的粘结力降低,从而不能承受较大的应力和应变。沥青混凝土开裂主要产生在低温环境下,混合料出现收缩裂缝,上述分析表明,裂缝修补组合结构具有良好的低温弯曲拉伸强度和较大的应

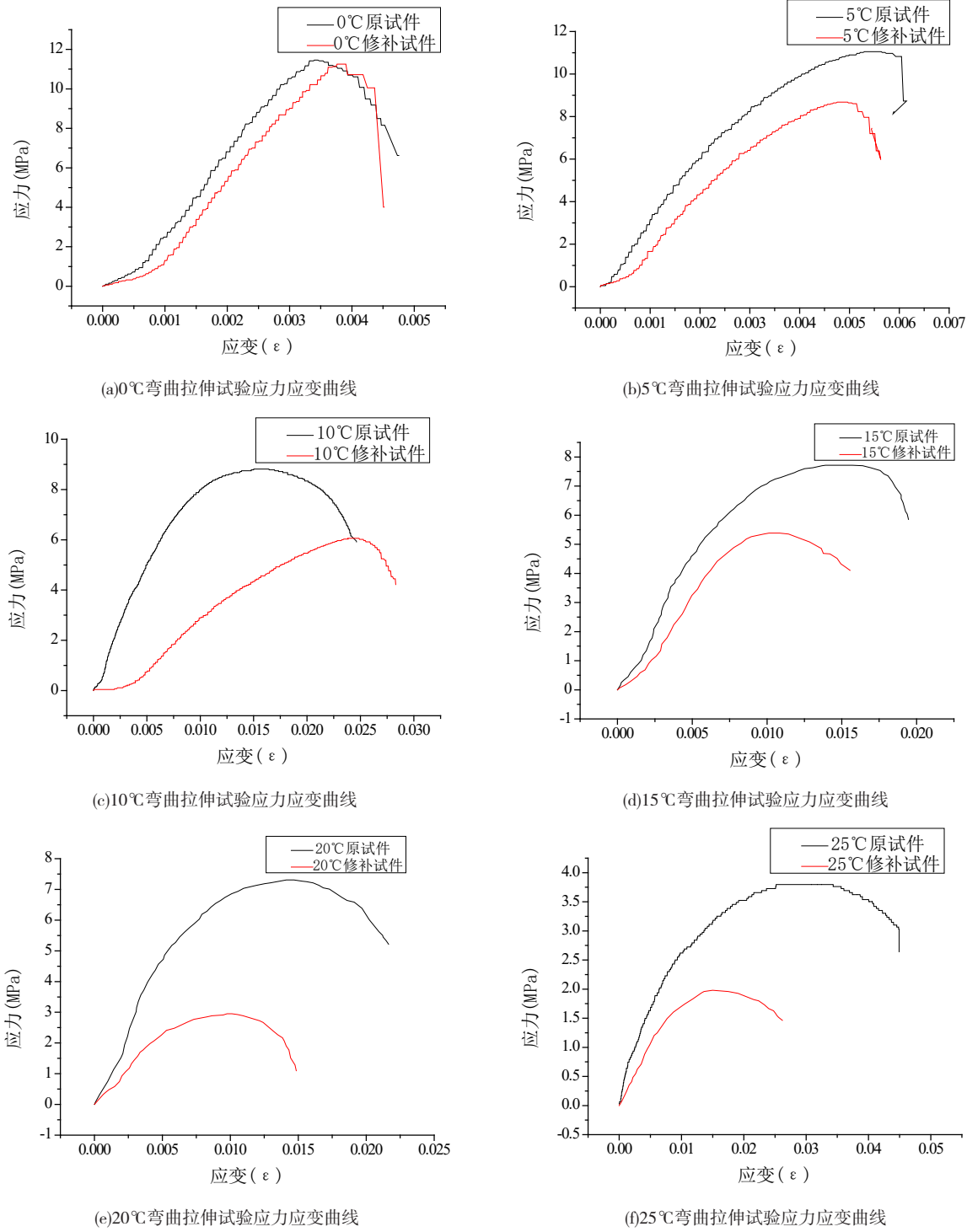


图7 弯曲拉伸试验应力应变曲线

Fig.7 Bending tensile test stress strain curve

变,能满足混合料低温抗裂性能。

2.4.2 破坏能计算

研究表明,三次多项式能够很好拟合沥青混凝土弯曲应力应变关系。通过对各温度下裂缝修补组合结构和原状试件弯曲拉伸应力应变曲线进行回归拟合,得出各温度应力应变曲线的拟合方程系数^[4-7],见表2。将式(5)代入式(4),则得到单位体积破坏能式(6):

$$\sigma = A\varepsilon^3 + B\varepsilon^2 + C\varepsilon + D \quad (5)$$

$$W_f = \frac{A}{4}\varepsilon_c^4 + \frac{B}{3}\varepsilon_c^3 + \frac{C}{2}\varepsilon_c^2 + D\varepsilon_c \quad (6)$$

由图8可以看到,无论是修补前小梁试件还是裂缝修补组合结构试件,温度对其弯曲劲度模量的影响是一致的,均随温度的升高呈现先升后降的趋势。由表3可知,在0~10℃

温度区间,裂缝修补组合结构破坏能与修补前接近,修补后与修补前的破坏能之比约达到70%以上,甚至在0℃时约为103%,说明裂缝修补组合结构的低温抗裂性较好。在15~25℃温度区间,修补前后的单位体积破坏能相差较大,说明超过15℃后,裂缝修补组合结构的力学相容性和修补效果不是很好。

表2 各温度下修补前后应力应变回归三项式系数

Tab.2 Stress strain regression trinomial coefficient before and after repair at each temperature

温度(℃)	试件类型	A	B	C	D
0	修补前	-4.9E+08	2.6E+06	122.87	0.1440
	修补后	-4.0E+08	2.5E+06	-798.63	0.1489
5	修补前	-2.1E+07	1.7E+05	3592.09	-0.3606
	修补后	-1.0E+08	5.9E+05	1512.79	-0.2797
10	修补前	4.9E+05	-5.4E+04	1321.10	-0.2984
	修补后	-7.5E+05	2.3E+04	137.17	-0.2437
15	修补前	5.8E+05	-5.5E+04	1225.91	-0.3884
	修补后	-3.0E+06	2.0E+04	670.48	-0.3588
20	修补前	5.6E+05	-5.7E+04	1236.27	-0.2614
	修补后	-1.4E+06	8.5E+03	529.56	0.03851
25	修补前	3.1E+04	-6.1E+03	271.09	0.3854
	修补后	8.3E+04	-1.0E+04	272.25	-0.05801

表3 各温度下修补前后单位体积破坏能

Tab.3 Failure energy per unit volume before and after repair at each temperature

温度(℃)	修补前破坏能 (kJ/m ³)	修补后破坏能 (kJ/m ³)	破坏能比(%)
0	0.0204	0.0210	102.9
5	0.0365	0.0253	69.3
10	0.0906	0.0818	90.1
15	0.0806	0.0304	37.7
20	0.0736	0.0230	31.3
25	0.0707	0.0220	31.1

注:破坏能比=修补后单位体积破坏能/修补前单位体积破坏能

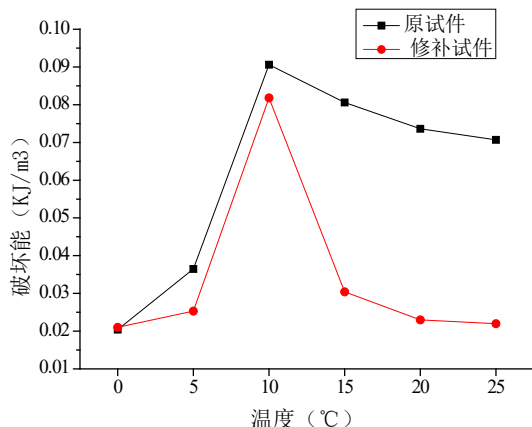


图8 破坏能-温度曲线

Fig.8 Destructive energy-temperature curve

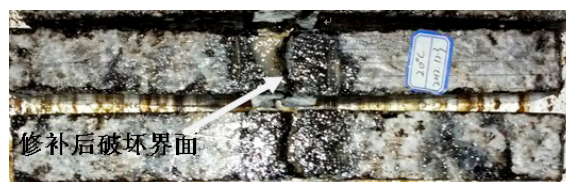
2.5 裂缝组合结构破坏形式

为了探讨裂缝修补组合结构的粘结和失效机制,更好地为混凝土裂缝修补提供技术支持,需将弯曲拉伸试验破坏形态对照其力学性能进行定性分析。图9是各温度下裂缝修补组合结构小梁弯拉试件的破坏形态。

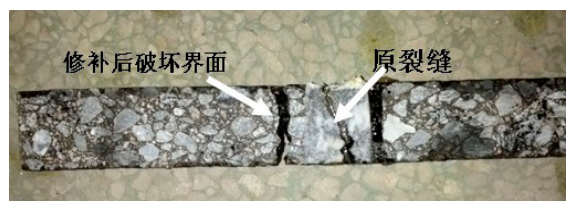
图9(a)为该裂缝修补组合结构在20℃的弯拉破坏形态特征。此时,裂缝修补组合结构沿原裂缝处二次开裂,破坏界面粘结着部分沥青,沥青混凝土出现蠕变滑移,属于修补界面失效,可能是因为修补材料与被修补的沥青混凝土基体的物理力学性能在此温度下存在较大差异。当荷载过大时,由于承受荷载和变形不协调,因而在修补界面出现了破坏。该破坏形态也说明20℃时裂缝修补组合结构力学相容性较差。

图9(b)为该裂缝修补组合结构在10℃的弯拉破坏形态特征。此时,破坏发生在原裂缝附近的混凝土基体处。这可能是因为,在修补之前,原裂缝附近的基体混凝土已产生部分损伤和缺陷,且修补材料自身的抗拉裂能力、界面粘结能力均高于旧混凝土基体。此时,裂缝修补组合结构的力学相容性较好,这与其力学性能数据结果完全吻合。

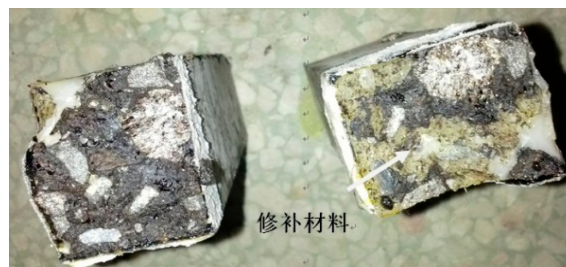
图9(c)为该裂缝修补组合结构在0℃的弯拉破坏形态特征。此时,裂缝贯穿了修补材料和混凝土基体,属于混合失效。这说明修补材料和混凝土基体共同协调变形,共同受力破坏,两者之间的强度和变形性能相差不大。结合0℃时的力学性能数据,说明此时裂缝修补组合结构的界面粘结效果和变形协调性能都较好,即该裂缝修补组合结构的力学相容性较好,修补效果较好。



(a)20℃组合结构破坏形态



(b)10℃组合结构破坏形态



(c)0℃组合结构破坏形态

图9 裂缝修补组合结构破坏形态特征

Fig.9 Crack repair combination structure failure morphological characteristics

3 结语

在0~10℃温度区间,该裂缝修补组合结构的低温抗开裂性能较好,协调变形能力较强,力学相容性较好。超过15℃后,该裂缝修补组合结构的力学相容性不足,需进一步优化修补材料与修补工艺。

弯曲拉伸试验能较好地检验裂缝修补组合结构的低温抗裂性能,其中,弯拉强度、破坏弯拉应变、破坏弯曲劲度模量、单位体积破坏能均能反映裂缝修补组合结构的低温抗裂性能,特别是单位体积破坏能可以综合评价裂缝修补组合结构的低温抗裂性能。

参考文献

- [1]孙志棋.基于收缩-松弛竞争机制的沥青混合料低温开裂机理研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [2]孙柯.沥青路面裂缝冷灌缝浆液扩散规律与灌缝技

术研究[D].济南:山东大学,2016.

[3]沈金安.沥青及沥青混合料路用性能[M].北京:人民交通出版社,2009:358-360.

[4]HUA F J, HU C P. Interpenetrating polymer networks of epoxy resin and urethane acrylate resin: 2. Morphology and mechanical property[J]. European polymer journal, 2000,36(1):27-33.

[5]WANG G Y, WANG Y L, HU C P. Interpenetrating polymer networks of polyurethane and graft vinyl ester resin: Polyurethane formed with toluene diisocyanate[J]. European polymer journal, 2000,36(4):735-742.

[6]袁建.沥青混合料路用性能评价指标研究[D].西安:长安大学,2005.

[7]王科.基于常规试验沥青混合料高低温性能评价指标研究[D].西安:长安大学,2011.

(上接第143页)

最大,模板量较大,施工期间人工费、机械费等较高;由于双向增设次梁,板跨分割较小,覆土较薄时屋盖板钢筋等材料性能不能充分发挥;梁布置较密集,造价增幅较大。

3.4 1道次梁方案

1道次梁方案中屋盖受力楼板接近单向板的受力方式,传递给次梁及框架梁,再由次梁传递给支撑主梁,使得支撑次梁的框架梁截面高度增加100~150mm。由YJK计算可知,此方案屋盖梁板含钢量稍小,单方混凝土用量最小。由于增加了一个方向的次梁,故单位面积下梁板底模面积较大跨厚板有所增加,但增幅不大,约为10%。此方案的优点是缩小了板跨,屋盖板厚度较小。但设备管道穿梁工作量、模板量有一定增加。由于支撑次梁的框架梁高度增加,建筑净高有所减少,应与建筑专业协商。

3.5 2道次梁方案

2道次梁方案中屋盖受力楼板为单向板的受力方式,传递给次梁,再由次梁集中传递给框架主梁,使得支撑次梁的框架主梁截面高度增加幅度较大,相较于大跨厚板梁高增加150~200mm;单位面积下梁板底模面积有所增加。由YJK计算可知,此方案屋盖梁板含钢量最小,单方混凝土用量适中。此方案的优点是缩小了板跨,屋盖板厚度较小。但设备管道穿梁工作量、模板量较1道次梁方案有一定增加。仅考虑单位面积梁板的含钢量来说,此方案最优。但是与1道次梁方案一样,会增加梁高,建筑高度会减小。

4 结语

综上,由YJK计算结果对比可知,从经济性来说,设置2道次梁布置方案屋盖梁板含钢量最小,模板量适中,可优先考虑;为满足建筑净高要求,考虑后期施工管道穿梁、喷淋布置、模板量等,可选择大跨厚板方案;1×1十字梁、2×2井字梁布置方案在覆土较厚或屋盖板上部荷载较大时,受力效果较好,可考虑选择。总体来说,具体工程应根据实际需要,在实现建筑功能、建筑净高的基础上,选择车

库屋盖最优的梁布置方式。

参考文献

- [1]GB 50011-2010,建筑抗震设计规范[S]. 2010.
- [2]GB 50009-2012,建筑结构荷载规范[S]. 2012.
- [3]GB 50108-2008,地下工程防水技术规范[S]. 2009.