

薄层环氧铺装材料病害成因分析与改进^{*}

尹昌宇, 孙杨勇, 韩亚芳, 陈林聪, 曾彦程

(广东省建筑科学研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510500)

摘要: 根据 G78 汕昆(汕头—昆明)高速公路隆百段 4 座隧道加铺环氧薄层后的情况,通过室内试验及现场拉拔测试对薄层环氧铺装材料应用中出现的脱落病害进行成因分析和改进。现场调研结果表明,与常温施工相比,低温施工区域出现脱落病害的概率更大,占总脱落面积的 80% 以上。室内试验结果表明,在低温下成型养护,面层砼块粘结强度在水煮老化后大幅下降至 0.7 MPa 以下,破坏形式也变为界面破坏,竣工后面层现场拉拔强度的变化趋势与此一致;在对胶粘剂进行降低粘度、改善界面相容性等改进后,面层受低温的影响变小,低温施工时的粘结强度及现场拉拔强度均未出现明显下降,破坏形式仍保持砼破坏。

关键词: 隧道;薄层环氧铺装材料;脱落病害;低温施工

中图分类号: U457

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0155-04

环氧薄层铺装材料是一类以改性环氧树脂为粘结剂,以单粒径碎石为骨料组成的铺装材料,具有良好的防滑、低温、抗车辙等性能,被广泛应用于弯道、交叉路口、坡道等对抗滑性能要求较高的路段。近年来,国内对其路用性能、抗疲劳性能和耐久性等开展了相关研究,并尝试将其应用于路面抗滑改造工程中。但由于开展相关研究的时间较短,也缺乏实际应用经验,薄层环氧铺装材料应用中出现了较严重的脱落、磨损等病害。环氧薄层磨损主要与所用骨料耐磨性不足有关,在应用高硬度、高耐磨的骨料后,该问题已基本得到解决。面层脱落原因则较复杂,除材料本身性能外,还与施工质量控制有关。针对上述问题,该文对 G78 汕昆(汕头—昆明)高速公路隆百段 4 座隧道在加铺环氧薄层铺装材料后的实际情况进行长期跟踪,结合室内试验分析导致面层脱落的原因,研究低温施工对环氧薄层界面粘结性能的影响。

1 室内试验方案

1.1 原材料

试验所用薄层环氧铺装材料由广东省建筑科学

研究院集团股份有限公司研发,其中胶结料为 MRS-18 型改性环氧胶及其改进型 MRS-21,骨料为 1.18~4.75 mm 特制耐磨铺装材料骨料。

1.2 试样制备

薄层环氧铺装材料与水泥砼基面粘结试样的制备:将改性环氧胶粘剂 A、B 组分按照设定质量比用搅拌器搅拌 3 min,将混合均匀的胶液按预定用量均匀摊铺在水泥砼块上并撒上足量骨料,根据设定条件养护对应时间后用植筋胶将钢制接头粘在面层上,在室温(23℃±2℃)下养护 1 d(条件)后备用。水泥砼块尺寸为 70 mm×70 mm×40 mm,粘结区尺寸为 40 mm×40 mm,薄层环氧铺装材料摊铺区域尺寸为 50 mm×50 mm,测试时用切割机将粘结区域切出井形槽,槽深约 1 cm。试验前将 A、B 组分在预定成型养护条件下恒温 24 h 以上,尽量在烘箱中操作。

1.3 测试指标与方法

对胶结剂及面层进行粘结强度、现场拉拔测试,测试方法见表 1。同时按照 JTG E60-2008《公路路基路面现场测试规程》,使用手工铺砂仪对环氧薄层的构造深度进行分析。

表 1 胶结剂及 MRK 力学性能测试

试验指标	试验仪器	试验速率	试验规程
薄层环氧与水泥砼基面粘结强度	电子万能试验机(GMT 4304)	2.0 mm/min	—
现场拉拔试验	锚杆拉拔仪(ZP-20)	0.1 MPa/s	ASTMC1583

^{*} 基金项目:广东省交通运输厅科技计划项目(科技 2014-02-003)

2 试验结果与分析

2.1 调研情况

G78 隆百段 4 座隧道因原隧道路面磨损严重,抗滑性能不足,于 2015 年 12 月—2016 年 1 月采用薄层环氧铺装材料进行罩面,总铺装面积约 9 万 m^2 。在完成薄层环氧罩面后,隧道路面抗滑性能得到大幅提升,通行安全性及舒适性得到明显改善,至今未发生一起交通事故。跟踪调研发现,在开放交通后薄层环氧罩面陆续出现脱落病害,未见明显磨损(见图 1)。脱落是薄层环氧罩面的常见病害,国内其他公司实施的薄层环氧罩面也出现了明显脱落现象(见图 2)。



图 1 G78 隆百段隧道铺装薄层环氧罩面照片



图 2 国内其他公司薄层环氧面层脱落情况

表 2 为 4 座隧道历次薄层环氧罩面调研情况。从表 2 可看出:薄层环氧罩面在施工完成后陆续出现脱落病害。竣工 8 个月时脱落总面积为 101.5 m^2 ,以 1、2 号隧道居多,4 号隧道最少;竣工 14 个月时总脱落面积为 16.0 m^2 ,以 2 号隧道为主;竣工 20 个月时总脱落面积为 198.8 m^2 ,以 1、2 号隧道居多;竣工 26 个月时总脱落面积为 16.6 m^2 ,以 2 号隧道为主。从调研时间来看,竣工 8 及 20 个月均为当年的 9 月份,总脱落面积达到近 300 m^2 ;竣工 14 及 26 个月为当年的 3 月份,总脱落面积仅为 32.6 m^2 ,而且两次脱落面积均约 16 m^2 。4 座隧道脱落最严重的是 1、2 号隧道,3、4 号隧道相对较少。但相对于近 9 万 m^2 铺装面积来说,病害率不到 1%。另外,对比发现,在经历 3—9 月高温及雨季的考验后,面层脱落概率远大于 10 月—来年 2 月这段低温少雨季节。

表 2 薄层环氧罩面调研情况

隧道 编号	方向	新增脱落病害面积/ m^2			
		竣工	竣工	竣工	竣工
		8 个月	14 个月	20 个月	26 个月
1	上行	19.0	0.4	24.5	1.6
	下行	18.4	1.2	45.0	0.5
2	上行	28.3	5.5	79.3	13.1
	下行	26.3	7.3	45.7	0.9
3	上行	4.0	1.2	4.2	0.2
	下行	5.0	0.2	0.1	0.1
4	上行	0.3	0.3	0.1	0.2
合计		101.5	16.0	198.8	16.6

注:上行为往隆林方向,下行为往百色市区方向。

表 3 为薄层环氧罩面的构造深度。由表 3 可知:薄层环氧罩面构造深度在通车后有所下降,但在 8 个月后即趋于稳定。刚竣工时,薄层环氧罩面构造深度均在 1.3 mm 以上,通车 8 个月下降到 1.1 mm 左右,竣工 14 及 26 个月时均保持在 1.1 mm 左右。说明所用石料的耐磨性较好。

表 3 薄层环氧罩面的构造深度

隧道 编号	构造深度/ mm				
	竣工时	竣工	竣工	竣工	规范 要求
		8 个月	14 个月	26 个月	
1	1.48	1.10	1.07	1.08	≥ 0.8
2	1.38	1.16	1.12	1.13	
3	1.39	1.12	1.09	1.10	
4	1.35	1.19	1.20	1.17	

注:测点位于慢车道左轮迹带,所用胶结料为 MRS-18 型改性环氧胶粘剂。

2.2 面层脱落成因分析

发现薄层环氧罩面脱落病害后,对施工记录、原材料检测报告等施工资料进行排查,4 座隧道所用铺装材料均合格,施工现场有技术人员指导并对各环节进行质量监控。但由于工期紧且处于冬季,部分路段施工时气温在 10°C 左右。为验证是否低温施工导致质量问题,对脱落面层位置施工时的气温进行统计(见表 4)。

表 4 施工温度对薄层环氧罩面脱落的影响

施工温度/ $^\circ\text{C}$	脱落面积/ m^2	所占比例/%
≤ 15	276.1	82.9
15~20	51.5	15.5
≥ 20	5.3	1.6

由表 4 可知:当施工温度低于 15℃时,薄层环氧罩面脱落面积达 276.1 m²,占总脱落面积的 82.9%;在 15~20℃时施工,面层脱落面积为 51.5 m²;施工气温高于 20℃时,脱落面积仅 5.3 m²。低温施工对薄层环氧罩面施工质量有明显影响。这可能是由于低温时胶液粘度过大,对基面浸润效果差,导致粘结耐久性差。

2.3 低温施工对粘结耐久性的影响

根据前面的分析,面层脱落与低温施工有直接

关系,同时在经历高温多雨的夏季后脱落速率明显加快。为此,在实验室通过水煮老化研究低温施工对面层耐久性的影响。为保证试验养护条件与低温施工时养护条件一致,将试验低温条件设为 15℃下成型并养护 24 h、10℃下成型并养护 48 h,并与常温条件 23℃、16 h 进行对比。在上述养护条件下,MRS-18 的拉伸强度均在 18 MPa 以上,以消除不同温度及养护时间下环氧树脂因交联程度不一对试验结果的影响。试验结果见表 5。

表 5 低温对薄层环氧面层耐水煮老化性能的影响

材料	老化前耐水煮老化性能						老化后耐水煮老化性能					
	23℃、16 h		15℃、24 h		10℃、48 h		23℃、16 h		15℃、24 h		10℃、48 h	
	粘结强	破坏	粘结强	破坏	粘结强	破坏	粘结强	破坏	粘结强	破坏	粘结强	破坏
	度/MPa	形式	度/MPa	形式	度/MPa	形式	度/MPa	形式	度/MPa	形式	度/MPa	形式
MRS-18	2.36	砼破坏	2.42	砼破坏	2.28	砼破坏	1.72	复合破坏	0.69	界面破坏	0.67	界面破坏
MRS-21	2.30	砼破坏	2.34	砼破坏	2.48	砼破坏	1.98	砼破坏	1.88	砼破坏	1.82	砼破坏

注:水煮老化条件为 80℃热水中煮 168 h。

由表 5 可知:MRS-18 胶在 23℃成型并养护 16 h 时,其在 80℃热水中老化 168 h 后的粘结强度由原来的 2.36 MPa 下降到 1.72 MPa 且破坏形式由砼破坏变为复合破坏;在 15℃下成型并养护 24 h 时,其粘结强度由原来的 2.42 MPa 急剧下降到 0.69 MPa 且破坏形式变为界面破坏;在 10℃下成型并养护 48 h 时,其粘结强度由原来的 2.28 MPa 大幅下降至 0.67 MPa,破坏形式也为界面破坏。低温对面层的耐水煮老化性能有明显影响。这可能与 MRS-18 低温时粘度较大有关。在低温下由于粘度高,胶对砼基面的渗透变差,无法达到良好的浸润效果,在雨水及高温作用下界面粘结失效。这一结论可从现场拉拔测试结果得到证实。

为解决低温施工问题,MRS-21 在 MRS-18 胶的基础上对其粘度进行改进并改善改性树脂胶与砼基面的相容性,MRS-21 在不同养护条件下的耐水煮老化性能见表 5。从表 5 可看出:MRS-21 无论是在 23℃成型并养护 16 h 的条件下,还是在 15

℃成型并养护 24 h、10℃成型并养护 48 h 的条件下,其在 80℃热水中煮 168 h 后的粘结强度均在 1.8 MPa 以上,且破坏形式为砼破坏。

2.4 现场拉拔测试结果

为验证室内试验所得结论,通过现场拉拔测试对面层与基面的界面粘结性能进行分析。表 6 为薄层环氧面层现场拉拔测试结果。由表 6 可知:在长时间开放交通后,低温施工面层的界面粘结性能明显下降。低温施工面层刚竣工时的拉拔强度为 1.82 MPa 且为砼破坏;随着使用时间的延长,拉拔强度逐渐下降,竣工 8 个月后下降到 1.54 MPa 且破坏形式变为复合破坏,竣工 26 个月进一步下降至 0.89 MPa;而正常施工面层在竣工 26 个月后的拉拔强度与刚竣工时相近,且破坏形式保持不变。

表 7 为不同胶粘剂薄层环氧面层现场拉拔测试结果对比。由表 7 可知:低温施工对 MRS-21 型薄层环氧面层粘结性能的影响较小。MRS-21 型薄层环氧面层在竣工 14 个月时的拉拔强度仍达到

表 6 薄层环氧面层现场拉拔测试结果

施工温度	现场拉拔测试结果							
	竣工时		竣工 8 个月		竣工 14 个月		竣工 26 个月	
	拉拔强度/MPa	破坏形式	拉拔强度/MPa	破坏形式	拉拔强度/MPa	破坏形式	拉拔强度/MPa	破坏形式
低温施工	1.82±0.15	砼破坏	1.54±0.23	复合破坏	1.17±0.18	复合破坏	0.89±0.13	复合破坏
正常施工	1.91±0.23	砼破坏	1.72±0.26	砼破坏	1.79±0.24	砼破坏	1.82±0.19	砼破坏

注:现场拉拔每处平行测试不少于 10 个,测试时地面温度为 22~27℃;低温施工挑选施工时气温在 15℃以下的路段进行测试;正常施工挑选施工时气温在 20℃以上的路段进行测试。

1.81 MPa,且为砼破坏,与刚竣工时的拉拔强度相比无明显变化。可见,采取降低粘度及增加相容性

的改进措施后,低温对薄层环氧面层粘结耐久性的影响得到改善。

表 7 不同胶粘剂薄层环氧面层现场拉拔测试结果对比

材料	现场拉拔测试结果							
	竣工时		竣工 8 个月		竣工 14 个月		竣工 26 个月	
	拉拔强度/MPa	破坏形式	拉拔强度/MPa	破坏形式	拉拔强度/MPa	破坏形式	拉拔强度/MPa	破坏形式
MRS-18	1.82±0.15	砼破坏	1.54±0.23	复合破坏	1.17±0.18	复合破坏	0.89±0.13	复合破坏
MRS-21	1.90±0.10	砼破坏	1.89±0.13	砼破坏	1.81±0.16	砼破坏	—	—

注:MRS-21 型薄层环氧罩面为试验段,施工气温为 8~13 ℃,地点为与 MRS-18 同一路段。

3 结论

(1) 低温施工是薄层环氧面层脱落的重要原因之一。在经历高温多雨的春、夏季后,低温施工的薄层环氧面层比正常施工的面层更易出现脱落病害,前者脱落面积占总脱落面积的比例高达 82.9%。

(2) 室内模拟试验表明低温施工对面层界面粘结耐久性有非常明显的影响,现场拉拔测试结果也证实了这一点。MRS-18 面层在 10 ℃养护 48 h、15 ℃养护 24 h 的条件下,在 80 ℃热水中煮 168 h 后的粘结强度由正常养护条件下的 1.72 MPa 下降到不足 0.7 MPa,破坏形式也由复合破坏变为界面破坏;现场拉拔测试结果表明,低温时施工的薄层环氧面层的拉拔强度在竣工 26 个月后迅速下降到 0.9 MPa 以下,而正常施工的面层其拉拔强度仍保持在 1.8 MPa 左右。

(3) 对胶粘剂粘度及界面相容性进行改进后,MRS-21 型薄层环氧面层在低温养护时的耐久性得到明显改善。在 10 ℃养护 48 h、15 ℃养护 24 h 的条件下,在 80 ℃热水中煮 168 h 后的粘结强度与正常养护条件下的相近,且破坏形式仍为砼破坏;竣

工 14 个月后的现场拉拔强度仍达到 1.81 MPa,且为砼破坏。

参考文献:

- [1] 李洪.轻型组合钢桥面聚合物超薄磨耗层试验研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [2] 周磊,王康,姜旭,等.改性环氧薄层材料在道路维修中的应用研究[J].建材世界,2017,38(5).
- [3] 张辉,单岗,潘友强,等.环氧沥青钢桥面铺装冷拌改性树脂薄层罩面技术研究[J].交通科技,2016(2).
- [4] 吴俊明,王伟,李少芳,等.环氧薄层铺装材料路用性能研究[J].公路,2016(10).
- [5] 钟鸣.改性环氧树脂薄层铺装层在桥面养护中的应用[J].中外公路,2013,33(6).
- [6] 李寻,王兴昌,方星,等.薄层环氧桥面铺装材料低温性能研究[J].中外公路,2011,31(5).
- [7] 胡宏源,申茂枝,盛大文,等.桥面环氧抗滑铺装层间粘结拉拔试验分析[J].建材世界,2013,34(1).
- [8] 李灏.薄层环氧桥面铺装材料的研究应用现状[J].建材世界,2012(1).

收稿日期:2018-04-18

(上接第 154 页)

参考文献:

- [1] 曹权,李清明,项伟,等.基坑群开挖对邻近既有地铁隧道影响的自动化监测研究[J].岩土工程学报,2012,34(增刊).
- [2] 叶耀东,朱合华,王如路.软土地铁运营隧道病害现状及成因分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(1).
- [3] 唐继民.自动化监测技术在隧道受损修复工程中的应用[J].测绘通报,2014(12).
- [4] 邱冬炜,梁青槐,杨松林.北京地铁隧道结构整体变形监测的研究[J].测绘科学,2008,33(增刊).

- [5] 胡蒙达,黄士兴,刘万兰.地铁隧道保护的技术标准及纠偏施工技术[J].建筑施工,1999,21(6).
- [6] 杨帆,赵剑,刘子明,等.自动化实时监测在地铁隧道中的应用及分析[J].岩土工程学报,2012,34(增刊).
- [7] 深圳市地铁集团有限公司.城市轨道交通运营安全保护区施工管理办法(暂行)[S].
- [8] 邱冬炜.穿越工程影响下既有地铁隧道变形监测与分析[D].北京:北京交通大学,2012.
- [9] 杨茜.盾构隧道纵向不均匀沉降及实时监测方法研究[D].北京:北京交通大学,2013.

收稿日期:2018-01-26