

## 运营地铁盾构隧道纠偏整治技术及自动化监测研究

龚柳<sup>1</sup>, 李剑波<sup>1</sup>, 陈雄武<sup>2</sup>

(1. 深圳市长勘勘察设计有限公司, 广东 深圳 518003; 2. 深圳市不动产登记中心, 广东 深圳 518040)

**摘要:** 运营中的地铁隧道由于周边建设项目的开展, 经常受到扰动, 引起位移和变形, 对隧道结构产生影响。为确保地铁线路的安全运营, 对出现较大变形的隧道必须及时进行整治纠偏回调。文中以深圳地铁 1 号线受前海建设项目影响区段整治工程为依托, 阐述了运营盾构隧道注浆纠偏方案及其实施过程; 介绍了隧道纠偏阶段自动化实时监测系统及其实施方法、监测控制指标, 分析了隧道注浆纠偏实施效果。

**关键词:** 隧道; 盾构隧道; 变形; 纠偏整治; 自动化监测

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)04-0150-05

随着深圳市城市轨道交通建设的快速发展, 不断带动其沿线及保护区内商业、房地产等项目建设。这些建筑或在隧道两侧或在隧道上方, 基坑开挖、土体卸荷等将引起周围地层移动, 导致隧道周边位移场及应力场发生变化。轻则引起隧道结构沉降、水平位移、弯曲、扭曲、开裂等, 使地铁隧道限界改变、结构和道床剥离、轨道几何形位改变等, 重则引发暗坑、三角坑、吊板等, 造成列车平顺性变差甚至脱轨, 严重威胁地铁的运营安全。为确保地铁线路的安全运营, 对出现较大变形的隧道必须及时进行整治纠偏回调, 将安全事故威胁降至最低。运营盾构隧道的整治纠偏回调属于抢险性工程, 工程施工方案需根据实际监控量测反馈数据及时调整、完善, 并在注浆纠偏中运用自动化监测技术严密监控隧道及周边土体的变化情况, 分析隧道纠偏实施效果, 为现场纠偏施工提供依据。该文以深圳地铁 1 号线受前海建设项目影响区段整治工程为依托, 阐述运营盾构隧道纠偏方案和纠偏阶段自动化实时监测技术, 分析隧道纠偏实施效果, 为类似工程提供借鉴和指导。

## 1 工程概况

深圳地铁 1 号线受前海建设项目影响的鲤鱼门站—前海湾站区间盾构隧道位于深圳市前海合作区, 鲤前区间南侧为华润项目基坑, 该基坑东西向长约 360 m, 南北向宽约 160 m, 深度 21~27 m。基坑距离鲤前区间左线隧道最短水平距离约 37.5 m。受影响段和基坑平面位置见图 1。

受前海建设项目基坑开挖的影响, 鲤前区间 SK 25+030—290 段约 260 m 范围隧道发生沉降偏

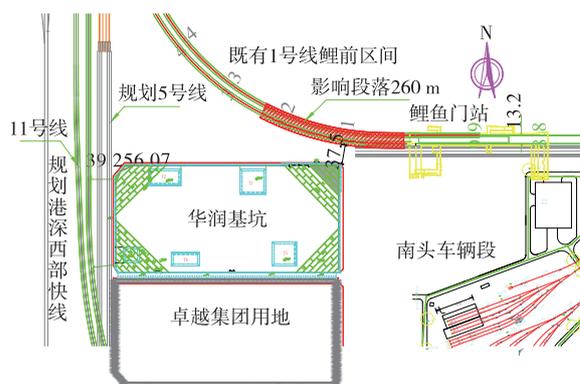


图 1 工程所在区域平面示意图(单位:m)

移, 累计沉降达 78 mm, 往基坑侧水平移位约 28 mm, 区间盾构隧道管片间出现错台及漏水, 对深圳地铁 1 号线的运营安全造成严重威胁, 需对影响段隧道及时纠偏回调。

## 2 隧道纠偏方案

设计考虑通过注浆和卸土相结合的方法对隧道进行纠偏。先尝试“小卸载+水平注浆纠偏+竖向注浆纠偏”方案对隧道进行回调, 在效果不明显的情况下再采取“大卸载+注浆纠偏”方案, 纠偏措施实施过程中根据现场实际效果调整和优化施工方案。

根据沉降数据对土方卸载进行分区, 按照沉降 >50、30~50、<30 mm 将施工区域分为 A、B、C、D、E 共 5 个区, 考虑到 C 区较长, 进一步细分为 C-1、C-2、C-3 3 个分区(见图 2)。

现场纠偏实施过程(见图 3): 1) 小卸载。对左线隧道上方 2 m 覆土先行卸载, 局部释放和回调已达临界状态的管片内力和变形, 并观测土体卸载对

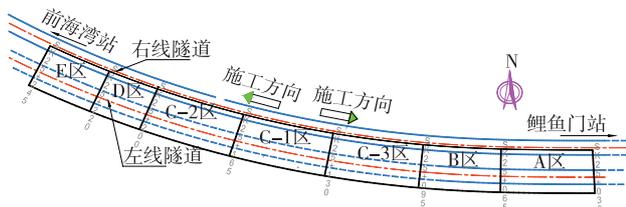


图2 土方卸载分区示意图

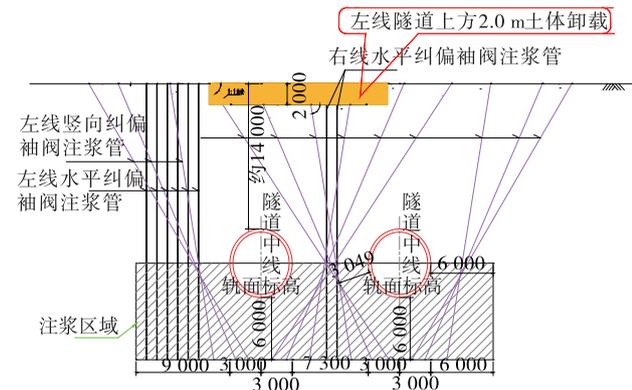
隧道回调的作用。2) 水平纠偏注浆。对左、右线隧道基坑侧土体进行竖向袖阀管压密注浆,加固基坑侧土体,并通过控制注浆压力对隧道进行水平纠偏。3) 竖向纠偏注浆。于左、右线隧道两侧各布置斜向袖阀管,袖阀管纵向间距1 m,横向布置3排,向隧道底部进行压密注浆,并进行竖向纠偏。4) 大面积卸载回调。若注浆纠偏措施未达到预期效果(回调30 mm),则对隧道上方土体进行大面积卸载纠偏。按沉降 $>50$  mm的区段卸载至7.5 m深、沉降30~

50 mm的区段卸载至5 m深、沉降 $<30$  mm的区段卸载至2.5 m深的原则进行纵向卸载分区。纵向开挖每级基坑间按1:1放坡连接,从沉降最大位置向两侧开挖,采取大面积浅层开挖方式逐层向下开挖,每层开挖深度不大于1 m。土体卸载7.5 m深处隧道最小埋深为5 m。5) 回调到位,压密注浆。卸载完毕后对隧道洞周土体进行压密注浆,注浆范围为隧道顶部3 m、隧道两侧9 m、隧道底部以下6 m,并预留后续跟踪注浆管。6) 选择合适时机回填。为避免隧道上方土体回填后再次产生沉降和基坑侧水平位移,在华润基坑封闭后再进行回填。

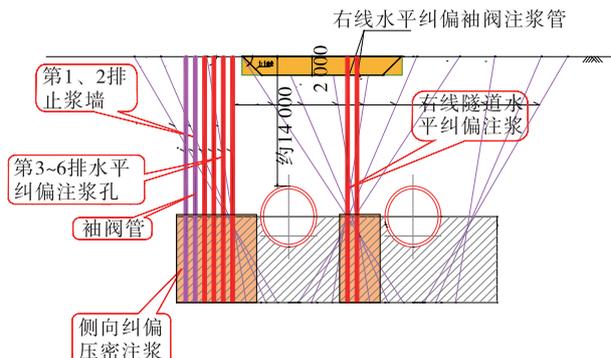
### 3 隧道纠偏自动化监测技术

#### 3.1 自动化监测系统

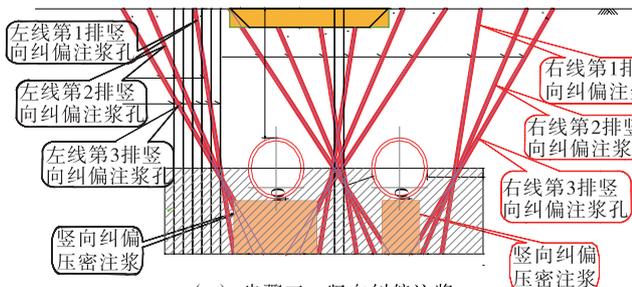
考虑到注浆纠偏在每天0—5点地铁停运期间进



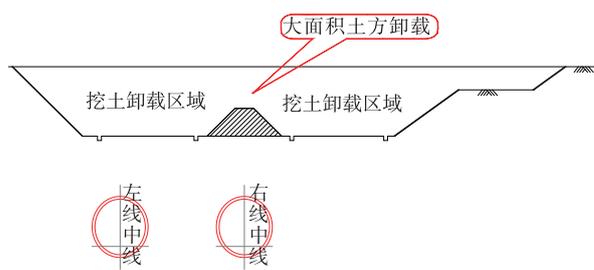
(a) 步骤一: 小卸载



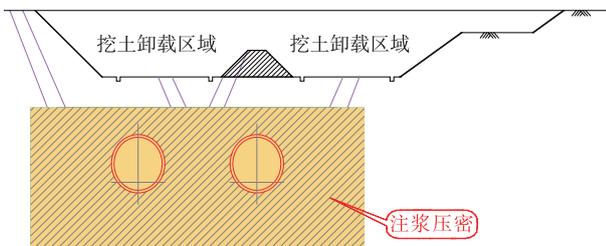
(b) 步骤二: 水平纠偏注浆



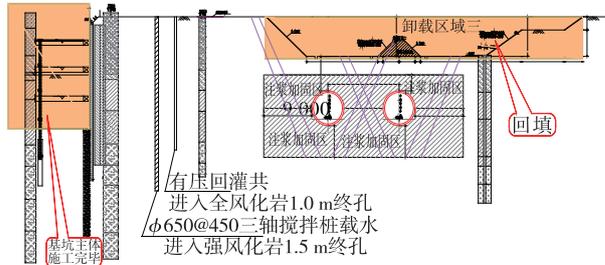
(c) 步骤三: 竖向纠偏注浆



(d) 步骤四: 大面积卸载回调



(e) 步骤五: 回调到位, 压密注浆



(f) 步骤六: 选择合适时机回填

图3 隧道纠偏实施步骤(单位:cm)

行,结合工程实际情况,配套使用徕卡 TS50 测量机器人与 Geomos 监测软件实现自动化监测(见图 4)。徕卡 TS50 全站仪能自动调焦、自动正倒镜监测、自动进行误差改正、自动记录监测数据,其独有的 ATR(Automatic Target Recognition)模式使全站仪能进行自动目标识别,其标称精度为 $\pm 0.5''$ 、 $0.6\text{ mm}\pm 1\text{ ppm}$ 。Geomos 专业监测软件是实现自动化监测的平台,可远程控制测量机器人,自动处理接收到的监测数据,生成监测成果表及变形曲线。

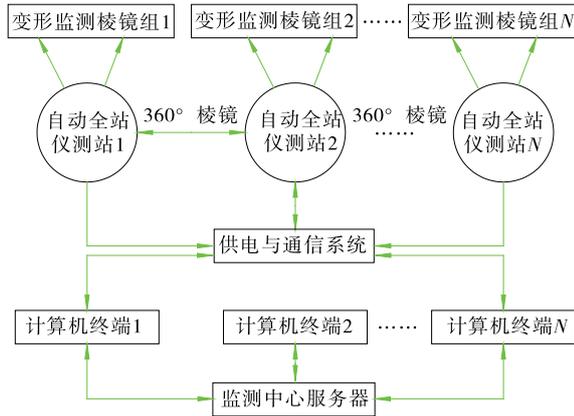


图 4 自动化监测系统的配置

监测系统主要由数据采集、数据传输、系统总控、数据处理、数据分析和数据管理等部分组成,其通信模式分为远程遥控预案和紧急通信预案。

### 3.2 监测点布设

根据相关规范要求,常规地铁隧道自动化监测断面间距一般为 5~10 m,考虑到该工程应急抢险的特殊性,在隧道左、右线监测范围内每 1.5 m 布置一个监测断面,监测里程为左线 ZSK25+000.0—255.0、右线 YSK25+009.5—264.5。每个监测断面布置 7 个监测点,分别为道床 2 个、侧壁 2 个、拱脚 2 个、拱顶 1 个,共布置监测点 2 394 个(见图 5)。

为保障测量精度,在施工影响监测范围之外设置 9 个以上基准点,严格控制测站与观测点的距离,测站点和监测点的垂直角小于 $10^\circ$ ,直线距离控制

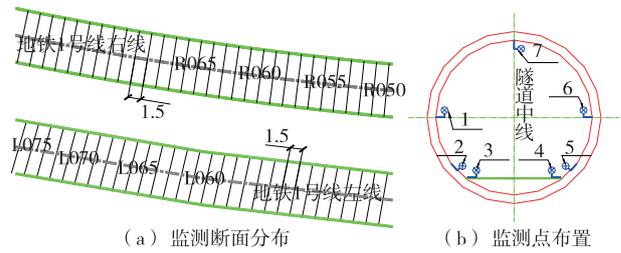


图 5 监测平面布置示意图(单位:m)

在 150 m 以内。

### 3.3 监测控制指标

纠偏作业实施过程中,根据项目实际情况实行的变形监测控制指标为:

- (1) 每环盾构管片布置一个监测断面,监测精度达到 $\pm 1\text{ mm}$ 。
- (2) 注浆期间隧道竖向位移回弹超过 2 mm/d 时加大监测频率,并停止注浆,根据竖向位移监测值动态施工。

### 3.4 自动化监测数据处理

该工程自动化监测项目共布设 12 台套测量机器人,24 h 监测约 2 394 个监测点,每天会产生超过 25 000 点/次的自动化监测数据。为顺利分析处理海量自动化监测数据,使用 Visual Basic 语言设计并实现海量自动化监测数据处理程序。该程序拥有数据传输、数据存储、数据编辑、数据处理、数据调用、曲线图绘制、隧道断面收敛分析、报告编制等功能,可根据工程需要及时处理分析监测数据。

## 4 纠偏效果分析

鲤前区间左线隧道距离基坑最短水平距离约 37.5 m,其中 C 区(SK25+095—200)为重灾区,下面重点分析该区段的注浆纠偏效果。

### 4.1 水平纠偏注浆过程及效果分析

左线隧道水平纠偏注浆施工过程见表 1,纠偏注浆施工后的水平位移和竖向位移变化分别见图 6、图 7。

表 1 水平纠偏注浆施工过程

施工部位	施工时段	孔深/m	注浆压力/MPa	注浆量/L	位移/mm	
					水平	竖向
第 1 排	2015-03-30-04-25	26.3	0.5	1 284.6	无	无
第 2 排	2015-04-14-04-29	26.3	0.5	1 130.2	1.4~2.6	0.7~1.5
第 3 排	2015-04-20-05-03	26.3	0.3	733.4	1.7~2.1	0.9~1.5
第 4 排	2015-04-24-05-13	26.3	0.3~0.5	675.3	2.3~5.1	2.2~2.6

续表 1

施工部位	施工时段	孔深/m	注浆压力/MPa	注浆量/L	位移/mm	
					水平	竖向
第 5 排	2015-04-28-05-15	26.3	0.3~0.5	597.7	3.8~6.5	1.9~3.9
第 6 排	2015-05-04-05-18	26.3	0.3~0.5	569.9	2.7~6.2	2.6~3.9

注:第 1~6 排对应于图 3 (b)中的注浆孔。

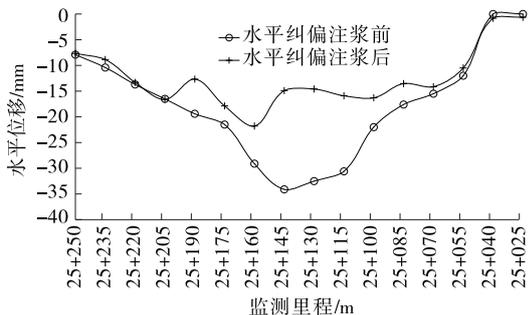


图 6 左线隧道水平纠偏完成后水平位移变化曲线

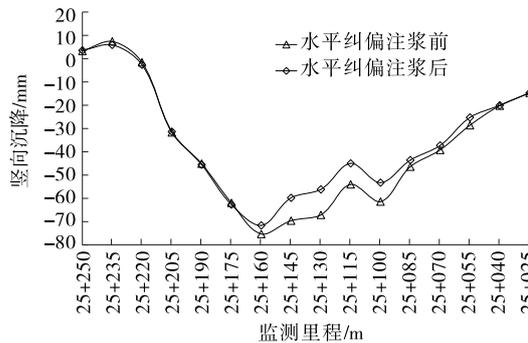


图 7 左线隧道水平纠偏完成后竖向位移变化曲线

由图 6、图 7 可知:水平纠偏完成后,左线水平位移最大回调约 19.1 mm,恢复至原状的 57%,隧道最大偏移量减小到 23 mm 以内;竖向位移最大回调约 15.6 mm,隧道最大沉降量减小至 73 mm 以

内。地面注浆对隧道回调效果明显。

#### 4.2 竖向纠偏注浆过程及效果分析

左线隧道竖向纠偏注浆施工过程见表 2,纠偏后的水平位移和竖向位移变化分别见图 8、图 9。

表 2 竖向纠偏注浆施工过程

施工部位	施工时间段	孔深/m	注浆压力/MPa	注浆量/L	位移/mm	
					水平	竖向
第 1 排	2015-05-19-06-03	26.6	0.5	1 644	0.5~1	无
第 2 排	2015-05-27-06-18	28.5	0.8	1 443	0.9~1.8	0.6~1.6(C-2、C-1 区)
第 3 排	2015-06-12-07-09	26.3	0.5	1 594	1.7~2.1	2.1~4.2(有 1~2 回弹)

注:第 1~3 排对应于图 3 (c)中的注浆孔。

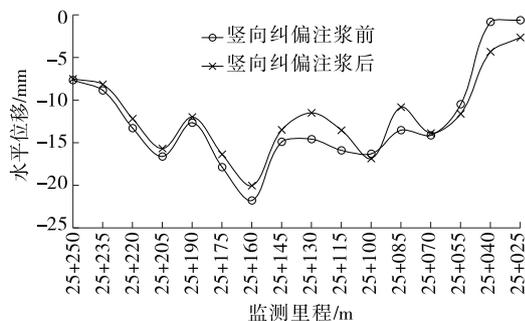


图 8 左线隧道竖向纠偏完成后水平位移变化曲线

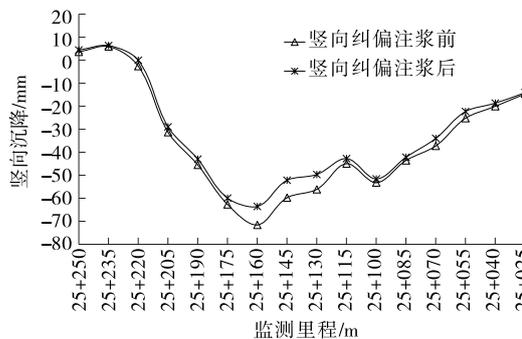


图 9 左线隧道竖向纠偏完成后竖向位移变化曲线

由图 8、图 9 可知:竖向纠偏完成后,左线水平位移最大回调约 3.5 mm,竖向位移最大回调约 6.2 mm,隧道最大沉降量减小至 65 mm 以内,结合水

平纠偏阶段数据变化,隧道竖向累计最大变化值为 17.1 mm,竖向纠偏效果不明显。原因可能是在竖向回调启动初期,为防止对隧道造成较大扰动,不敢

贸然施工,注浆压力控制在 0.3~0.5 MPa,水平纠偏过程中浆液串流,对隧道进行包裹加固,浆液固结后造成后续注浆困难。

针对竖向纠偏效果不明显的问题,2015年6月10日将注浆斜孔孔深增加3m,对应注浆范围增加,对原加固土体进行挤压实现竖向上调,注浆范围上部增加3m形成封闭,防止冒浆现象。至2015年6月24日,注浆过程中土体吸浆量小,流速慢,每段注浆稳压达到20min以上,压力达1.0MPa,隧道仍无明显抬升。据此判断隧道管片周边及周边土体在水平纠偏注浆和竖向纠偏注浆过程中已被浆液包裹,填充形成整体。若继续加大注浆压力,会对已加固土体造成劈裂破坏,注浆压力将直接作用于管片而造成管片二次破坏,故停止竖向注浆纠偏作业。以左线为例,纠偏结束后(截至2015年7月23日)各区段隧道变形趋势见表3。

表3 纠偏结束后盾构隧道左线变形趋势

监测区段	累计回调变形量/mm	
	竖向	水平
A区	5.1(隧道拱顶)	3.5(朝向基坑内侧)
B区	8.3(隧道拱顶)	11.3(朝向基坑外侧)
C-3区	17.8(隧道拱顶)	18.1(朝向基坑外侧)
C-1区	13.8(隧道拱顶)	23.2(朝向基坑外侧)
C-2区	7.9(隧道拱顶)	12.1(朝向基坑外侧)
D区	4.0(隧道拱顶)	7.8(朝向基坑外侧)
E区	2.5(隧道拱顶)	4.3(朝向基坑外侧)

2015年7月20日,隧道水平及竖向纠偏注浆结束,华润基坑逐步恢复开挖作业。从华润基坑恢复开挖后隧道基本无变形及现场注浆已进浆困难的情况判断,隧道周边已被注浆加固体包裹,加固效果基本满足设计要求。注浆结束后经过3个月的观测,隧道内各监测点的监测数据无明显变化,隧道已恢复稳定状态。

#### 4.3 纠偏过程隧道收敛情况分析

华润基坑开挖后隧道管片由圆状变成扁平圆状态。图10为典型断面收敛变形纠偏前后的变化。为清晰表现纠偏前后隧道断面的相对位置及收敛情况,说明纠偏前后隧道断面相对位置关系及收敛整治效果趋势,图中监测点相对位移均乘以50倍放大系数。从中可见,纠偏施工后管片变形形状趋于真圆,纠偏效果好。

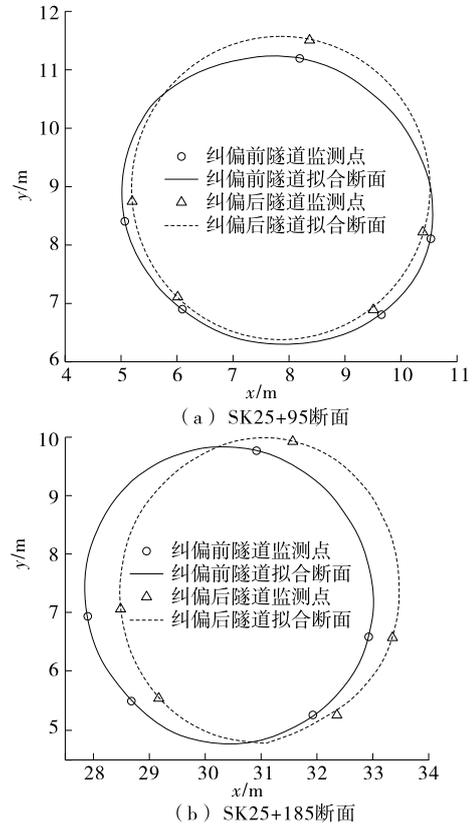


图10 隧道断面收敛变形情况对比

## 5 结论

(1) 经过注浆纠偏施工,华润基坑附近的地铁隧道水平纠偏实现水平位移最大回调23.2mm,最大偏移量减小至20mm以内;竖向纠偏实现竖向位移最大回调18.4mm,隧道最大沉降量减小至62mm以内。隧道管片往真圆趋势改变,管片受力情况大大改善,隧道结构安全得到保证。

(2) 基于测量机器人的自动化监测系统可实现全天候无人值守自动化监测,为现场施工提供科学可靠的数据指导,为地铁安全运营提供重要保障。

(3) 盾构隧道纠偏整治工程中,在隧道内每1.5m布置一个监测断面,注浆期间的变形监测控制值为2mm/d,能保证监测数据的代表性和监测结果的科学性,指导施工现场不同区段注浆参数调整。

(4) 建议在运营期地铁隧道周边进行施工前,先采用基于点云数据的地铁三维激光扫描仪对隧道影响区段进行全方位扫描,快速判断地铁隧道变形情况,在施工过程中再结合自动化监测技术进行变形监测,将安全隐患降到最低。

(下转第158页)

1.81 MPa,且为砧破坏,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	砧破坏	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	砧破坏	1.89±0.13	砧破坏	1.81±0.16	砧破坏	—	—

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48h、15℃养护24h的条件下,在80℃热水中煮168h后的粘结强度由正常养护条件下的1.72MPa下降到不足0.7MPa,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0.9MPa以下,而正常施工的面层其拉拔强度仍保持在1.8MPa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48h、15℃养护24h的条件下,在80℃热水中煮168h后的粘结强度与正常养护条件下的相近,且破坏形式仍为砧破坏;竣

工14个月后的现场拉拔强度仍达到1.81MPa,且为砧破坏。

### 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