

城市地下隧道变形缝渗漏水治理技术研究与应用

周文宇¹, 杨奎², 陈喜坤², 董飞², 杨敬², 赵光², 李奥²

(1. 无锡市城市重点建设项目管理中心, 江苏 南京 214031; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 针对某地下立交隧道的渗漏水病害, 采用综合调查、现场测试等方法进行系统性的分析研究, 并采取在隧道重点部位设置结构自动化健康监测系统的形式, 对外部环境温度的季节性影响进行观测研究。结果表明: 路面泛碱、拥包病害产生的主要原因为变形缝处渗漏地下水沿路面层间窜水; 隧道季节性伸缩变形, 引起伸缩缝变形可达10 mm; 缝间堵水是渗漏水治理的关键。经过对病害因素的分析, 采用复合改性沥青基柔性注浆料封堵变形缝并结合驱水、堵水、封水三层次方案, 可有效地解决地下水渗漏。研究成果可为同类病害的治理提供参考借鉴。

关键词: 地下隧道; 渗漏水; 变形缝; 改性沥青; 健康监测

中图分类号: U457.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0305-04

Research and Application of Water Leakage Control Technology in Deformation Joint of Urban Underground Tunnel

ZHOU Wenyu¹, YANG Kui², CHEN Xikun², DONG Fei², YANG Jing², Zhao Guang², LI Ao²

(1. Wuxi Municipal Key Construction Project Management Center, Nanjing 214031, China; 2. JSTI GROUP, Nanjing 210019, China)

Abstract: Aiming at the water leakage in an underground interchange tunnel, the systematic analysis is carried out by comprehensive investigation and field test. And a structural automation health monitoring system is set up in key parts of the tunnel to observe and study the seasonal impact of external environmental temperature. The result shows that the main cause of pavement caustic soda and packing damage is the leakage of groundwater along the interlayer of the pavement at the deformation joints. The seasonal expansion and contraction deformation of tunnels will cause the deformation of expansion joints up to 10 mm. The blocking water between joints is the key to control the water leakage. By analyzing the disease factors, the composite modified asphalt based flexible grouting material is used to seal the deformation joints, and combined with a three-level scheme of water displacement, water blocking and water sealing, the groundwater leakage can be effectively solved. The research result can provide the reference for controlling the similar diseases.

Keywords: underground tunnel; water leakage; deformation joint; modified asphalt; health monitoring

0 引言

城市地下立交隧道形式复杂, 存在大跨、分叉、异形, 并形成叠层、错层等多种形状, 故施工工序复杂, 其中各类结构缝是运营期间隧道渗漏水的主要位置, 而渗漏水病害的整治是保障隧道运行安全的关键。

龚晓南等^[1]研究了隧道及地下工程的渗漏原因和防治措施, 给出了渗漏水的分类、主要影响因素、检测和处治方法, 提出应重点加强注浆封堵、浆液扩散、浆水相互作用及新材料方面的研发, 对未来渗漏

水治理提出新的展望; 骆建军^[2]基于对轨道交通运营期隧道的调研, 全面梳理并总结了隧道渗漏水的原因、治理材料和处理工艺, 对相关研究现状进行了综述; 马伟斌等^[3]根据铁路运营隧道的检测数据, 对隧道病害进行了归纳和分析, 采用隧道状态评估法, 确定了运营期隧道的劣化状态; 董飞等^[4]对北京地铁隧道的检测结果进行了分析, 认为盾构隧道各类渗漏水病害的根源是管片接缝变形, 因而结构缝隙处是渗漏水集中区; 黄俊等^[5]采用现场调查、综合探测等方式对城市地下立交隧道路面渗漏水病害发生的原因进行了分析和验证; 黄立纬^[6]在水利水电工程中, 通过对新型速凝膏浆及低热沥青在大孔隙地层中的应用开展试验验证, 验证了材料性能和工艺的可靠性; 李鹏飞^[7]对地铁车站的渗漏水问题开展

收稿日期: 2024-08-06

作者简介: 周文宇(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 从事市政工程项目管理工作。

研究,采用预埋注浆管方式填充了车站侧墙背后储水缺陷,有效地解决了地铁车展渗漏水问题;丁鸿志等^[8]以园腾路隧道为研究对象,针对半智能化结构健康监测方式进行研究,对比分析了多种传感器的监测结果,验证了形状传感器在健康监测中的有效性。

本文以某城市地下立交隧道为实例,对隧道渗漏水的原因进行调查与分析,结合自动化健康监测系统进行数据观测,确定了隧道变形缝随环境温度变化伸缩变形范围,可采用高黏性、高延伸性的改性沥青基柔性注浆材料对引发路面渗漏水病害的变形缝进行处治。本文提出的处治方案可对其他类似工程具有借鉴意义。

1 工程概况

本项目为城市地下互通立交,周边环境复杂,紧邻商业街、居民区,对环境影响的控制要求高,故分为两期建设。地下互通主线为双向6车道,设计速度为80 km/h,一期建设在负三层预留主线隧道,二期与既有道路隧道衔接;负一层和负二层为匝道层,为单孔双车道形式,设计速度40 km/h,匝道全长2 614 m。

隧道主体结构为钢筋混凝土,防水设计等级为二级。隧道区的地质水文条件复杂,穿越地层以软弱粉质黏土为主,存在承压水,地下水稳定水位在地表以下1.4~1.7 m,变动幅度为2.0 m。隧道采用明挖法施工,基坑支护形式为钢筋混凝土支撑和钢支撑,最大开挖深度为26 m。

2 渗漏水典型病害调查及分析

2.1 结构变形缝渗水

通过对现场变形缝渗漏水状态的调查,隧道暗埋段有渗漏水迹象的变形缝为30条,占隧道变形缝的51%,说明变形缝整体渗水量较大,局部为股状出水。经由三维声纳渗漏检测仪探测表明单点渗水量最大为18.7 L/d,渗水量平均值为0.14 L/(m²·d),如图1所示。

2.2 沥青路面渗水

现场调查发现沥青路面有11处渗漏水位置,渗漏点在变形缝周围区域较为集中,以泛碱、拥包形式为主,典型病害如图2所示。

对现场的病害位置进行取芯,芯样显示:沥青面层间及面层与铺装层间无黏结,显示为双分离;其中7处为面层与铺装层之间无黏结,显示为单分离,现

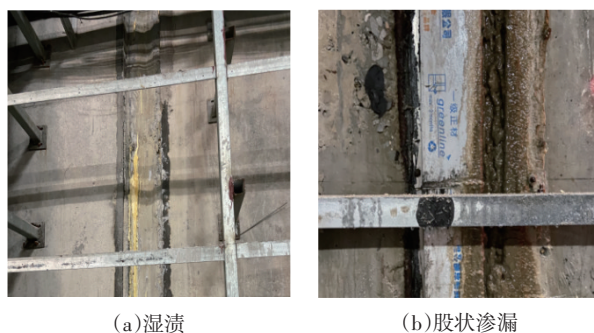


图1 变形缝典型渗漏水状态

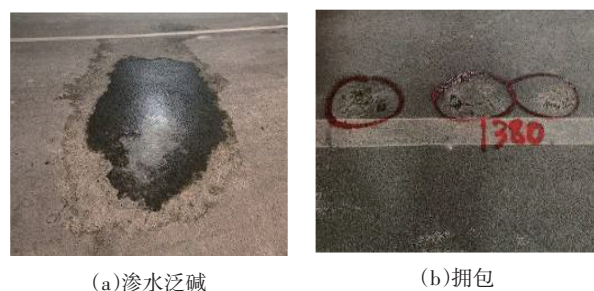


图2 沥青路面典型病害

场取得典型芯样如图3所示。

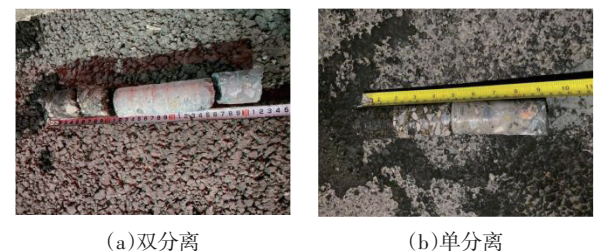


图3 隧道路面取芯结果

为查明路面渗漏水及变形缝附近病害集中的原因,通过对现场路面结构取芯,对比分析病害处的渗漏水状态,可得钻孔与变形缝的相对位置关系如图4所示,对比分析结果如表1所列。

观测结果表明,邻近变形缝钻孔处的渗水量明显大于远离变形缝的位置。分析认为距离变形缝越近则渗水压力越大,同时层间黏结效果也对横向窜水距离影响较大,在水压较大时致使路面发生拥包现象,而层间黏结效果较好的路面,水压损失较快,对远处路面影响小。

3 隧道结构健康监测

为进一步观测隧道结构的变形情况,在隧道临近洞口、异形结构、结构段面变化处设置自动化健康监测系统,对接缝变形量进行监测。在ENK0+050和ENK0+104处的监测曲线如图5所示。

接缝变形量监测数据表明:在2023年6月至

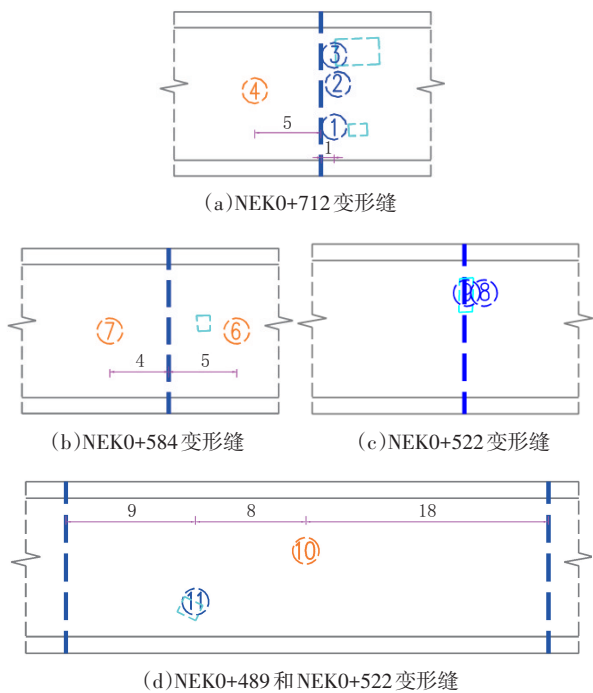


图4 钻孔位置与变形缝相对位置(编号为取芯钻孔,粗虚线为变形缝,单位:m)

表1 路面病害渗漏水观测对比表

渗水变形缝	路面湿渍处	路面干燥处
孔距缝≤3 m	孔内渗水 190 ~ 260 mL/min (钻孔1、3、9)	孔内渗水 120 mL/min (钻孔2、8)
孔距缝≥3 m	孔内渗水 90 mL/min (钻孔11)	孔内无渗水 (钻孔4、6、7、10)

2024年3月期间总体变形量呈上升趋势,2023年6月至10月,接缝变形量较小,增大速度较慢;2023年10月至2024年3月,接缝变形量上升速度较快;最大值为9.706 mm,最小值为-0.034 mm,呈现出随着环境温度的降低、接缝变形量增大的趋势,整体规律为由缓慢张开转变为快速上升。

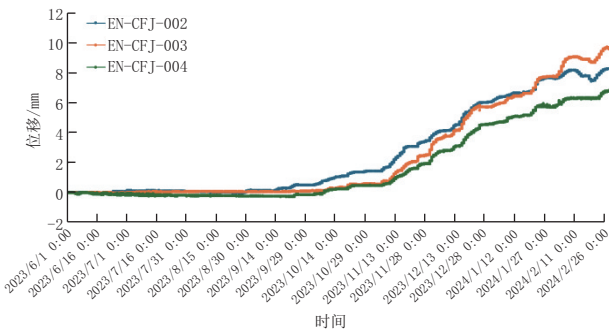


图5 EN匝道结构接缝变形量监测曲线

4 渗漏水病害治理

4.1 治理方案

根据调查,隧道路面典型渗漏水病害与变形缝

直接相关,而变形缝的防水结构显然已经局部失效。因此,变形缝防水结构的再造是本次渗漏水治理的重点。针对变形缝的结构和构造特点制定结构背后驱水、变形缝间堵水、缝间顶部封水的3层次防水实施方案;采用注浆方式在混凝土结构外新建防水层,为尽可能利用和保护中埋式止水带的防水效果并满足变形缝伸缩变形的要求,在其下部注入改性环氧树脂,上部开槽灌注延性和黏性更好的沥青基柔性材料,顶部设置聚醚封层。

4.2 材料选择

在结构变形缝背后新建防水层要求注浆材料应与混凝土能具备良好的结合性,具备耐久性好、凝结速度快、抗压强度高和水下不分散等优点。水下不分散水泥基灌浆料在潮湿水泥基面黏结性好、抗压强度高,水下呈现聚集状态,其主要性能指标如表2所列。

表2 水泥基灌浆料主要性能指标表

序号	检测项目	性能指标
1	流动度/mm	初始
		30 min
2	凝结时间/h	初凝
		终凝
3	黏结强度/MPa (潮湿基面)	3 d
		14 d
4	抗压强度/MPa	2 h
		1 d
		7 d
		28 d

变形缝的主要作用是为了控制由温度引起的收缩变形,缓解结构变形的影响。根据本项目的结构健康监测数据,变形缝材料应能适应大于10 mm的变形量,才能满足变形缝的伸缩变形要求。沥青是工程中常用材料,其改性后对于潮湿混凝土面具有极好的黏附性和延伸性,可满足变形缝伸缩变形的要求,同时可通过打孔注浆、切槽灌注等多种方式用于解决地下结构渗漏水堵漏的问题,如图6所示,其主要性能指标如表3所列。

4.3 治理措施与工艺

(1)变形缝路面拆除

对变形缝两侧50 cm范围内的路面结构以及防撞墙进行拆除,并用地质雷达、钢筋扫描仪探测结构背后的脱空和钢筋位置,为后期注浆打孔提供依据。

(2)结构背后注浆驱水

在变形缝处的路面拆除后,在两侧30 cm处横向

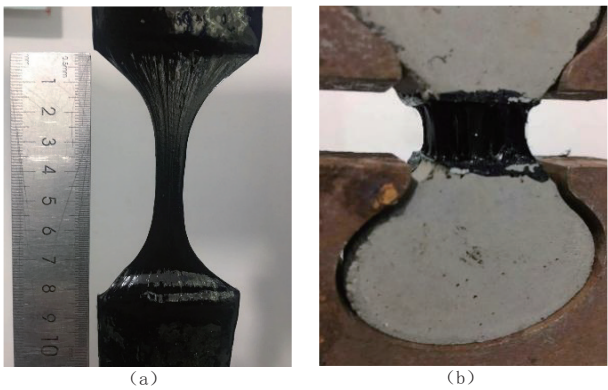
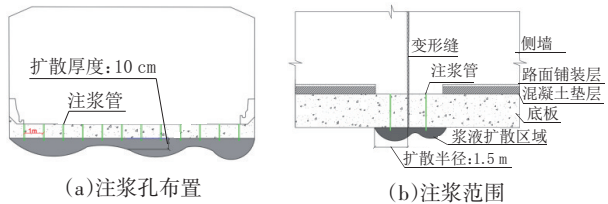


图6 改性沥青材料延伸性和黏结性

表3 改性沥青材料主要性能指标表

序号	项目	技术指标
1	固含量/%	≥98
2	延伸性/mm	≥50
3	低温柔性	-20℃ 无断裂
4	黏度/(mPa·s)	120℃ ≤1 000
5	黏结性能	潮湿基面 100%内聚破坏
6	热老化 (70℃、168 h)	延伸性/mm ≥30 低温柔性 -15℃无断裂
7	抗窜水性/0.6 MPa	无窜水

间距200 cm交错布置 $\phi 20$ mm的注浆孔,孔深至铺装层,用内窥镜、卷尺测量其孔深,确认结构层厚度、注浆孔布置并进行成孔检查,如图7所示。注浆后在变形缝外部会形成新的外部防水层,可阻挡外部渗水,为后续施工创造有利的施工环境。



(c)注浆孔内窥镜检查

图7 注浆孔布置和成孔检查

(3)变形缝间防水功能功能修复。

a. 在中埋式钢边止水带下方,注浆灌入亲水型环氧树脂,再造其止水功能,注浆材料主要性能指标如表4所列。

表4 亲水型环氧树脂灌浆料主要性能指标表

序号	项目	指标
1	黏度(25℃)/(MPa·s)	-4~14
2	弹性模量/MPa	2 250
3	耐水和酸碱浸泡后强度变化/%	<8.5和<12.0
4	耐老化后强度变化/%	<12.0
5	水中固化时抗压/冲击/剪切/拉伸强度/MPa	55/5.5/30/18

b. 采用角磨机、切割机及电锤等,对中埋式钢边止水带上方的变形缝进行开槽清理,清理深度至止水带上约5 cm,开槽深度20~25 cm。

c. 在清理后的槽中灌注改性沥青基注浆料,经检查确认后,在沥青基材料表面灌注硅烷改性聚醚(主要性能指标如表5所列)厚约20~25 mm,变形缝的防水功能修复如图8所示。

表5 硅烷改性聚醚主要性能指标表

序号	项目	指标
1	固体含量/%	99
2	拉伸强度/MPa	2.25
3	潮湿基面黏结强度/MPa	1.17
4	弹性恢复率/%	95
5	盐处理黏结强度/MPa	1.28

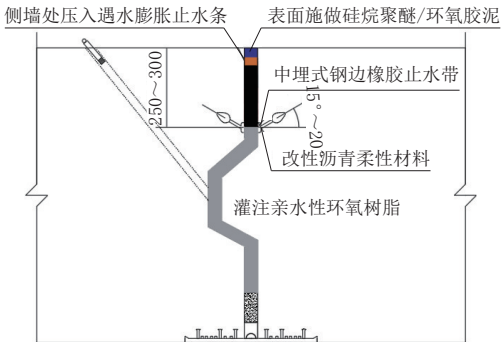


图8 变形缝间防水功能修复

4.4 治理效果检验

采用注水保压方法测试对渗漏水的治理效果。在距变形缝两侧0.3~0.5 m打3个测试孔,孔深至中埋式钢边止水带的下方,采用高压注浆机向孔内注水,当注水压力达到1~1.5 MPa后停止加压,观察压力是否能保持稳定,5 min后读取的压力表数值即为保压值。

根据本项目隧道所处区域的地下水埋藏条件,确定测试保压值为1.5倍隧道埋深,且不小于0.45 MPa;经现场实测保压值介于0.7~1.0 MPa之间,满足防水要求。

5 结 语

本文针对某地下立交隧道渗漏水病害,采用多种方法进行探测,查明路面渗漏水病害的原因,并对

(下转第316页)