

城市下穿隧道结构耐久性与病害治理技术研究

吴拓良

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i4.20277

[摘要] 城市下穿隧道在投入运营后,会因为服役环境、交通荷载、施工缺陷等多因素影响,出现各类结构病害问题,影响行车和隧道结构的安全。本文系统分析城市下穿隧道结构耐久性的影响机制,并提出基于层次分析法和模糊评价法的下穿隧道结构耐久性评估方法,同时梳理了下穿隧道结构中常见的病害类型及病害治理技术,最后结合工程实例对城市下穿隧道结构耐久性评估和病害治理中的技术要点展开了进一步探讨分析,以供参考。

[关键词] 城市下穿隧道; 结构耐久性; 评价方法; 病害治理技术

中图分类号: U45 文献标识码: A

Study on structural durability and disease control technology of urban underpass tunnel

Tuoliang Wu

China 11th Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] After the urban underpass tunnel is put into operation, various structural diseases will occur due to the service environment, traffic load, construction defects and other factors, which will affect the safety of traffic and tunnel structure. In this paper, the influence mechanism of the durability of urban underpass tunnel structure is systematically analyzed, and the durability evaluation method of urban underpass tunnel structure based on analytic hierarchy process and fuzzy evaluation method is put forward. At the same time, the common disease types and disease treatment technologies in urban underpass tunnel structure are sorted out, and finally the technical points in durability evaluation and disease treatment of urban underpass tunnel structure are further discussed and analyzed with engineering examples for reference.

[Key words] urban underpass tunnel; Structural durability; Evaluation method; Disease control technology

引言

城市下穿隧道一般情况下会穿越城市软土地层,该类区域水文地质条件差且受城市地下水、环境介质侵蚀影响显著,这就导致下穿隧道在运营过程中易引发裂缝、渗漏水、钢筋锈蚀等病害,若未及时开展治理,将加剧结构耐久性退化,缩短工程使用寿命^[1]。因此,做好对下穿隧道结构耐久性评估方法和病害治理技术的研究,对于类似工程处理和确保城市下穿隧道运营安全具有积极促进作用。

1 城市下穿隧道结构耐久性影响机制与评估方法

1.1 耐久性关键影响因素与退化机理

下穿隧道结构耐久性的退化是多因素共同作用的结果,各因素通过不同机理引发结构性能下降。(1)外部因素是耐久性退化的主要诱因,软土地层的差异沉降会使结构产生附加应力,引发裂缝发育,地下水的持续渗透会加速混凝土碳化与钢筋锈蚀;车辆动荷载的反复作用会使衬砌结构产生疲劳损伤,降低结构的承载能力;城市大气中的CO₂会引发混凝土碳化,破坏钢筋钝

化膜,氯离子等腐蚀性离子会随地下水侵入结构内部,加剧钢筋锈蚀^[2]。(2)内部因素为耐久性退化的内在条件,混凝土材料的强度、密实度及钢筋保护层厚度若未满足设计要求,会降低结构的抗侵蚀能力;施工过程中的振捣不密实、接缝封堵不严、模板安装偏差等施工缺陷,会直接造成结构初始损伤,为外部侵蚀介质的侵入提供通道。各因素相互耦合,形成“初始损伤—外部侵蚀—应力作用—性能退化”的恶性循环,最终导致结构耐久性持续下降。

1.2 耐久性评估指标体系与评估模型

为评估下穿隧道结构的病害情况,必须从多维度入手,形成评估体系。做好对其的精准量化评估。综合考虑下穿隧道的结构特点和耐久性影响因素,可以围绕结构材料的性能、结构几何变形、病害发育程度和服役环境4个方面形成评估体系,然后再以混凝土强度、碳化深度、钢筋保护层厚度、道面沉降、拱顶下沉、断面收敛、裂缝宽度、渗漏水等级、地层稳定性、地下水腐蚀性等指标作为具体评价指标,之后再通过层次分析法和

专家打分以及矩阵计算,分别确定各层级指标的权重,最后再通过模糊综合评价法形成评估模型,根据具体评估结果将待评估下穿隧道结构的耐久性状态分为优、良、中、差4个级别,最后利用模糊变换计算对应的隶属度,从而确定结构的耐久性等级。

2 下穿隧道结构的典型病害特征分析与治理技术

2.1 病害类型与分布特征

结构耐久性的退化最终会表现为各类显性病害,梳理典型病害的类型与分布特征,可为针对性治理提供依据。城市下穿隧道的典型病害主要分为三类,一是裂缝与渗漏水病害,为最常见病害,裂缝多分布于暗埋段拱顶、侧墙及变形缝处,部分裂缝贯通形成渗漏通道,渗漏水主要出现在结构接缝、裂缝处及敞开段与暗埋段衔接处;二是衬砌结构变形病害,表现为道面沉降、拱顶下沉、断面收敛,暗埋段中间管节的拱顶沉降通常大于两侧管节,敞开段的断面收敛程度高于暗埋段;三是钢筋锈蚀与混凝土破损病害,多分布于侧墙、路缘石及变形缝周边,表现为混凝土起皮、空鼓、剥落,严重处出现钢筋裸露与锈蚀,此类病害由地下水侵蚀与混凝土碳化共同引发。各类病害并非独立存在,裂缝的发育会加剧渗漏水与钢筋锈蚀,而结构变形会进一步扩大裂缝,形成病害耦合发展的特征^[3]。

2.2 分级分类治理技术体系

下穿隧道的病害治理需遵循“分级施策、分类治理”的原则,根据病害的严重程度与类型制定针对性的治理技术,以确保病害治理效果。

2.2.1 裂缝与渗漏水治理技术

裂缝治理需根据裂缝宽度划分处理等级,宽度小于0.2mm的细微裂缝,采用环氧树脂表面封闭法进行处理,阻止侵蚀介质侵入;宽度0.2~5mm的中等裂缝,采用低压慢灌法灌注环氧树脂灌浆料,填充裂缝内部并实现胶结;宽度大于5mm的宽裂缝,采用聚氨酯灌浆料封堵渗水通道后,粘贴碳纤维布对裂缝周边结构进行加固。渗漏水治理以“堵、防、排”结合为原则,点渗与线渗采用化学注浆法封堵,面渗采用注浆封堵结合防水卷材铺设的方式处理;变形缝渗漏水为治理重点,需拆除原有破损的封堵材料,更换遇水膨胀止水条,填塞高性能密封胶,外侧辅以水泥-水玻璃双液注浆封堵,形成多重防水体系。

2.2.2 衬砌加固技术

在衬砌结构出现变形、收敛超标或者承重能力下降时,需采用有效的加固技术来修复其结构稳定性。一般情况下,当衬砌结构出现拱顶下降和断面收敛变小时,就可以通过碳纤维布加固相关结构,因为碳纤维布具有较高的抗拉强度,能够弥补原衬砌的强度不足缺陷;如果衬砌的变形情况比较严重,则必须通过型钢支撑和锚杆注浆加固的方法,利用二者的高强固结和支撑作用,约束结构的进一步变形;而对于敞开段和暗埋段衔接位置的薄弱病害区域,则可以采用外包混凝土加固的方式,通过增加结构的截面积,以此来增强其结构承载力和稳定性。

2.2.3 钢筋锈蚀与混凝土修复技术

钢筋锈蚀与混凝土破损的治理需坚持“先治腐、再修复”的原则,先消除锈蚀诱因,再对破损混凝土进行修补。对于钢筋裸露锈蚀的部位,人工剔除破损、酥松的混凝土,采用钢丝刷与除锈剂清除钢筋表面的锈蚀层,涂刷环氧阻锈剂形成防护膜,补充绑扎钢筋网片后,采用C40及以上高性能修补混凝土浇筑;对于混凝土起皮、空鼓的部位,剔除空鼓部分的混凝土,将基层打磨平整并涂刷界面剂,采用聚合物砂浆进行分层修补,保证修补层与原结构结合密实;对于路缘石等附属结构的细微裂缝与破损,采用聚合物水泥基防水涂料进行表面封闭与局部修补。

3 工程案例

3.1 工程概况

某下穿隧道于2014年建成通车,全长约480m,属于单孔双向两车道下穿隧道。隧道由敞开段、暗埋段及U型槽接线段组成,隧道口高约3m,车辆通行高度2.8m。工程场区主要穿越淤泥质粉土和粉土夹粉砂层,场地整体稳定性一般,地下水位埋深浅,局部软弱地基易产生差异沉降。该隧道运营多年后,出现明显的结构耐久性退化现象,现场巡查发现拱顶贯通缝、钢筋裸露、混凝土起皮空鼓、变形缝衍生裂缝等病害,经前期监测,道面累计沉降值在2mm以内,拱顶最大累计沉降4.37mm,断面累计收敛值4.26~8.09mm,急需进行修复治理。

3.2 耐久性检测与评估

通过现场实测和实验室室内检验对结构的各方面性能进行检测,结果显示混凝土强度满足设计要求,但部分测点碳化深度达35~45mm,钢筋保护层厚度局部不足30mm;而在结构几何变形方面,道面沉降无进一步发展,拱顶下沉与断面收敛处于稳定状态,但暗埋段拱顶沉降仍超出设计预期。现场实测发现拱顶存在1条贯通缝,最大宽度5mm,变形缝周边衍生裂缝最大宽度3mm,侧墙及路缘石处有8处混凝土起皮空鼓,3处钢筋裸露锈蚀。

基于上述检测数据,采用层次分析法-模糊综合评价法开展耐久性评估,确定准则层权重:结构材料性能(0.35)、结构几何变形(0.30)、病害发育程度(0.25)、服役环境风险(0.10)。通过模糊综合评价计算,该隧道结构耐久性的综合隶属度为:优(0.12)、良(0.35)、中(0.38)、差(0.15),根据最大隶属度原则,判定其耐久性等级为中,需针对现有病害开展针对性治理,同时采取措施提升结构耐久性。

3.3 病害诊断与治理方案设计

基于检测与评估结果,对该隧道的病害进行诊断,该隧道的病害由多因素耦合所引起:(1)拱顶贯通缝与变形缝衍生裂缝主要因软土地层差异沉降引发结构应力集中,加之施工接缝处理不当,导致裂缝持续发育;(2)渗漏水病害由裂缝作为渗透通道,地下水持续侵入引发;(3)混凝土起皮空鼓与钢筋锈蚀主要因地下水与大气CO₂共同作用,混凝土碳化破坏钢筋钝化膜且局部钢筋保护层厚度不足,加速了钢筋锈蚀。各病害的治理方案如表1所示。

表1 隧道病害类型及治理方案

病害类型	核心成因	具体治理方案
裂缝与渗漏水	软土差异沉降、施工接缝处理不当	1. 拱顶裂缝治理措施: 聚氨酯灌浆+碳纤维布粘贴 2. 变形缝治理措施: 更换止水条+密封胶填塞+双液注浆封堵
钢筋锈蚀与混凝土破损	混凝土碳化、钢筋保护层不足、地下水侵蚀	1. 钢筋锈蚀后用混凝土进行浇筑修补 2. 剔除混凝土中的破损部分, 然后用聚合物砂浆进行修补 3. 路缘石部分需要涂刷防水涂料用于封闭渗漏途径
衬砌结构轻微变形	软土地层初始沉降, 交通荷载反复作用	在暗埋段拱顶粘贴碳纤维布, 用于提升衬砌的抗拉强度, 有效约束结构变形

3.4 治理实施要点与效果评价

3.4.1 施工关键工艺

本次工程施工需要按照先封堵渗漏水, 再处理裂缝, 最后修补混凝土与加固衬砌的顺序开展, 各关键工艺的実施要点如下:

(1) 裂缝与渗漏水治理: 先采用高压水枪清理裂缝表面的浮渣、杂物, 对拱顶贯通缝切槽嵌缝, 埋设灌浆嘴, 采用低压慢灌法灌注聚氨酯灌浆料, 待浆料固化后拆除灌浆嘴, 用密封胶封堵槽口; 随后对拱顶裂缝周边1.5m范围进行基层打磨, 涂刷环氧底胶, 粘贴200g/m²碳纤维布, 采用滚筒压实排除气泡, 养护7d。变形缝治理拆除原有破损封堵材料, 清理缝内杂物, 更换遇水膨胀止水条, 填塞聚硫密封胶, 外侧采用水泥-水玻璃双液注浆, 注浆压力控制在0.3~0.5MPa, 确保注浆饱满。(2) 钢筋锈蚀与混凝土修复: 人工剔除钢筋锈蚀部位的酥松混凝土, 采用钢丝刷清除钢筋表面锈蚀层, 涂刷环氧阻锈剂, 补充绑扎Φ8钢筋网片, 支设定型模板, 浇筑C40高性能修补混凝土, 振捣密实后养护14d; 混凝土起皮空鼓部位剔除空鼓混凝土, 打磨基层并涂刷界面剂, 采用聚合物砂浆分层修补, 每层厚度不超过20mm, 确保修补层与原结构结合紧密。(3) 衬砌加固: 暗埋段拱顶基层打磨平整, 清除浮灰, 涂刷环氧底胶, 按设计要求粘贴碳纤维布, 搭接宽度不小于100mm, 粘贴完成后涂刷面胶, 养护至设计强度, 确保碳纤维布与衬砌紧密贴合, 有效传递应力。

3.4.2 治理效果分析

治理完成6个月后, 对结构的性能、恢复和耐久性情况进行监测评估。

(1) 结构性能恢复方面, 跟踪检测结果显示, 隧道各类病害

均得到有效遏制: 拱顶裂缝与变形缝无渗漏水现象, 裂缝封闭密实, 碳纤维布粘贴牢固; 钢筋锈蚀部位经处理后无新的锈蚀现象, 混凝土修补处密实无空鼓、剥落, 路缘石细微裂缝无进一步发展; 结构变形趋于稳定, 道面沉降、拱顶下沉、断面收敛均无新增变化, 拱顶因碳纤维布加固产生0.8mm的微小回弹, 结构几何形态恢复至设计允许范围。(2) 耐久性提升方面, 二次检测显示, 混凝土碳化深度无进一步发展, 钢筋阻锈剂有效形成保护膜, 地下水侵蚀通道被彻底封堵, 结构的抗侵蚀能力显著提升; 采用层次分析法-模糊综合评价法开展二次耐久性评估, 综合隶属度为: 优(0.28)、良(0.45)、中(0.22)、差(0.05), 耐久性等级从中提升至良, 结构整体耐久性显著提升。此外, 治理后隧道的行车安全性与舒适性得到改善, 无因结构病害引发的交通隐患, 验证了本次采用的耐久性评估方法与病害治理技术的实用性与有效性。

4 结语

城市下穿隧道结构耐久性的退化是服役环境、交通荷载、施工缺陷等多因素耦合作用的结果, 其耐久性状态直接决定工程全寿命期服役性能。在下穿隧道结构病害治理过程中, 需要先通过相应的评估方法, 对结构的耐久性进行量化判断, 然后再根据病害的类型制定出针对性的治理技术体系和方案。同时还需要在方案实施过程中加强对各环节技术要点的控制, 从而确保病害治理目标的实现, 有效恢复下穿隧道结构的耐久性, 确保下穿隧道的运营安全。

[参考文献]

- [1]张伟帆, 苏春旭. 软土地层中浅埋地铁隧道结构病害诊断及变形特征分析[J]. 土工基础, 2025, 39(06): 884-890.
- [2]谢国义. 浅谈隧道病害的摸排论证及处置加固方案[J]. 四川水泥, 2025, (11): 217-219+222.
- [3]施德, 葛厚海. 隧道衬砌结构病害原因与养护智能决策系统分析[J]. 科技资讯, 2025, 23(13): 221-223.

作者简介:

吴拓良(1987--), 男, 汉族, 江西人, 大学本科, 中级职称, 市政。