

电力电缆隧道结构病害及检测评估方法探讨*

蒋雅君¹, 许阳², 陈鹏¹, 李彬¹, 任荣¹

(1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031;
2.中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

摘要:电力电缆隧道是目前常见的城市地下空间利用形态之一,但是该类隧道的结构病害检测技术体系和规范尚不完善,影响了该类隧道的病害评定及相应处治。电力电缆隧道的病害类型主要包括隧道渗漏水、隧道衬砌裂损、衬砌结构腐蚀这三大类型,其中影响较大的为隧道渗漏水。在电力电缆隧道的检测工作中,需要结合电力隧道的工作环境条件、功能特点,明确检测的目的和需求,有针对性地调查和收集相关的信息和资料以制定检测方案。检测的内容可以划分为外观检查、结构安全性检查、结构耐久性检查这三大类内容,以便选取适宜的仪器和方法开展电力隧道检测工作。论文提出了确定电力隧道结构区段的分项评定标准及综合技术状况评定方法,并建议依据检测评定结果对电力隧道采取对应的养护措施。

关键词:电力电缆隧道;结构病害检测;渗漏水;衬砌裂损;耐久性

中图分类号:TU93

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2019)01-0311-08

Discussion on the Defects and Its Inspection and Evaluation Methods for Power Cables Tunnel

Jiang Yajun¹, Xu Yang², Chen Peng¹, Li Bin¹, Ren Rong¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China; 2. China Highway Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100088, P.R. China)

Abstract: Power cables tunnel is one of the most common kinds of utilization of urban underground space, but the defect inspection and repair works for this kind of tunnel is usually limited by its uncomplete system of inspection techniques and specifications. Among the main defects of this kind of tunnel, such as the leakage problem, lining crack and damage, and corrosion of lining concrete, the most significant one is the leakage in the tunnels. The necessary information and documents of tunnels should be collected by investigation to make inspecting plans according to the working environmental conditions, function features of the tunnels and inspection purpose. The inspection works are suggested to be divided into appearance inspection, structural safety inspection and structural durability inspection, so that the appropriate items and the relevant methods could be determined for the inspection works. The evaluation classification for the technical condition of each tunnel section could be determined according to the proposed evaluation methods, hence the appropriate maintenance measures would be adopted after inspection.

Keywords: power cables tunnel; structure defect inspection; leakage; lining crack and damage; durability

* 收稿日期:2018-08-19(修改稿)

作者简介:蒋雅君(1980-),男,广西桂林人,博士,副教授,主要从事隧道及地下工程等领域的教学与科研工作。

E-mail:yajunjiang@home.swjtu.edu.cn

基金项目:四川省交通科技项目计划任务(2013C10-5)

0 引言

电力电缆隧道是容纳电缆数量较多、有供安装和巡视的通道、全封闭型的地下构筑物^[1],也是较为常见的城市地下空间利用形态之一。随着中国城市建设的发展和用电负荷的增加,城市电力电缆隧道的规划和修建近年来也逐步加快,各地建设及投入使用的电力电缆隧道的数量和长度也日益增多^[2-4],并且近年来电力电缆也被作为重要的部分被逐步纳入城市综合管廊的集约化建设中^[5],或者依托城市地铁进行同期修建^[6]。

虽然电力电缆隧道的结构设计方法和施工方法与公路、铁路、地铁隧道类似^[3-4,7],但是由于电力电缆隧道多处于城区软弱土层中,周边环境复杂,使得电力电缆隧道的结构病害特点也可能与上述隧道类型存在差异^[4,8]。交通隧道病害的检测、维护工作开展经验较多,并形成了较为完善的规范体系^[9-11],相比之下目前电力电缆隧道在病害检测等方面所开展的研究工作尚较少,虽然在一定程度上可以借鉴交通隧道的相关技术和经验,但是由于电力电缆隧道自身的特点和需求,所带来的一些问题(如专门的技术规范缺乏、病害检测项目及评定标准模糊等)还未得到很好的解决。

目前,电力电缆隧道常见的施工方法主要包括明挖法、矿山法、盾构法和顶管法等^[3-4,7]。从衬砌结构混凝土浇筑方式来划分,前两者可以视为现浇结构,后两者可以视为预制结构,其中现浇结构的电力电缆隧道目前较为常见^[4]。因此,本文对现浇结构电力电缆隧道的病害及检测方法进行探讨,期望能对城市综合管廊等类似的地下结构的病害检测提供一定的借鉴。

1 电力隧道常见结构病害类型

电力电缆隧道常见的结构病害类型主要包括渗漏水、衬砌裂损、衬砌腐蚀等几类^[4, 8, 12]。其中渗漏水(水害)的问题较为严重和突出,并对电力电缆隧道的安全运营造成了影响和损失^[13]。

1.1 隧道渗漏水

无论是明挖法结构还是矿山法结构,“结构缝”的部位(施工缝、变形缝)渗漏问题最普遍。造成此类部位渗漏的原因较多,但较为常见原因是该部位的防水措施在施工阶段未进行妥善处理,或者结构变形或沉降较大导致防水失效(实例如图1)。

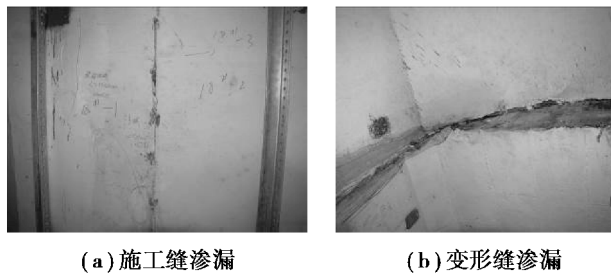


图1 电力隧道结构缝处渗漏

Fig. 1 Leakage at the structure joints

由于混凝土浇筑质量缺陷所形成的渗漏也较为常见,如混凝土不密实(蜂窝麻面)、施工冷缝、温度裂缝等,严重的情况下会造成隧道局部喷水且带出泥沙,对结构的稳定性造成影响(实例如图2)。

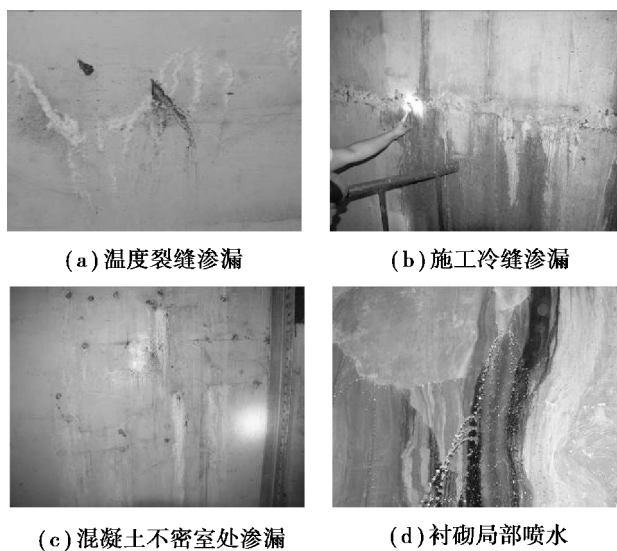


图2 电力隧道结构混凝土缺陷处渗漏

Fig. 2 Leakage at the structure concrete defects

电力电缆隧道衬砌中的预埋件、穿墙管、设备安装孔等部位也是渗漏的多发区域,往往会造成预埋件及设备锈蚀的情况(实例如图3)。

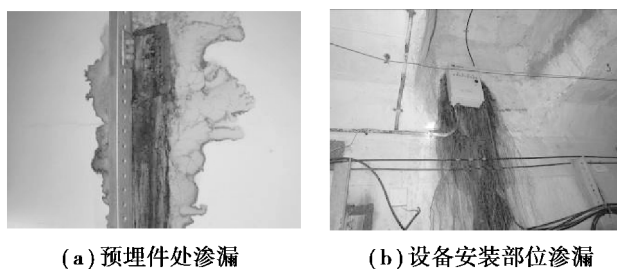


图3 电力隧道内预埋件等部位渗漏

Fig. 3 Leakage at the pre-embedded pieces

由于以上原因,加上电力电缆隧道内抽水设备损坏等情况造成隧道内积水较深和设备设施腐蚀,通常会对电缆的安全性和设备的正常工作造成极大

的影响,因此也是电力管理部门最为关注的问题。

1.2 衬砌结构裂损

隧道衬砌结构裂损的原因可能是衬砌结构的设计承载能力不足或施工质量问题所导致。结构裂损所造成的危害可能有:降低了衬砌结构的承载力,减小了隧道净空,裂损处往往伴随着渗水^[8]。

衬砌结构裂损的常见表现形式主要为开裂(其中纵向和斜向裂缝的危害最大),以及衬砌混凝土局部掉块(实例如图4)。

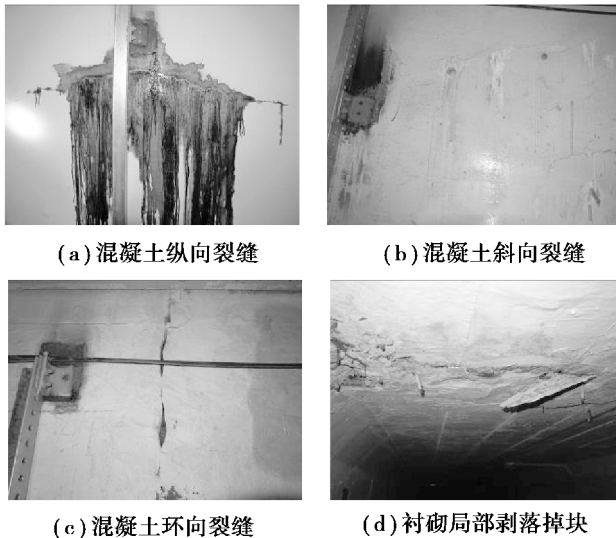


图4 电力隧道混凝土裂损

Fig. 4 Crack and damage of the tunnel lining

1.3 衬砌结构腐蚀

由于隧道的渗水以及腐蚀性地下水的影响,会对衬砌混凝土产生物理性或化学性的侵蚀作用,造成混凝土及钢筋腐蚀(实例如图5)。隧道衬砌腐蚀会使得混凝土变酥松,强度下降,降低隧道衬砌的承载能力及耐久性,更会危及电缆支架等隧道附属结构和设备的安全^[8]。

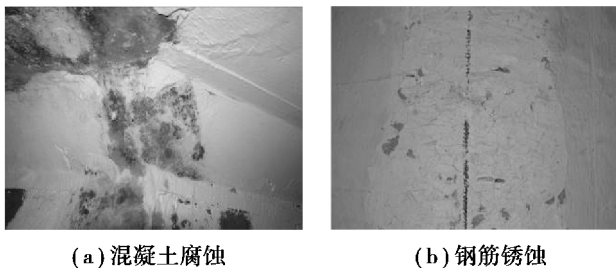


图5 电力隧道衬砌结构腐蚀

Fig. 5 Corrosions of the tunnel lining

2 电力隧道结构病害检测信息分析

检测前应收集必要的信息和资料,为综合制订电力隧道检测方案提供指导。

2.1 电力隧道基础资料收集

在隧道检测作业开展之前,必须进行现场踏勘并与隧道管理部门进行充分的沟通,尽可能地收集相应的基础资料。

与隧道管理人员的沟通是获取隧道基础信息的重要途径,需要了解隧道的设计、施工、养护等各方面的基本情况,并收集图纸和文件充分掌握隧道的基础信息,以保证检测、维修工作的针对性和有效性。但需要注意的是,针对目前很多电力隧道土建结构资料缺失的客观情况,检测单位应在检测方案中选定一些项目作补充调查。

现场踏勘时需要携带照相机和照明设备,对隧道结构型式、容纳电缆和设备、结构病害类型及分布情况、地理位置、地质条件、周边环境等内容进行调查,为检测方案制订提供基础信息。

2.2 电力隧道结构型式分析

本文主要讨论现浇结构电力隧道,主要包括明挖法和矿山法两大类结构型式,如图6所示^[8]。

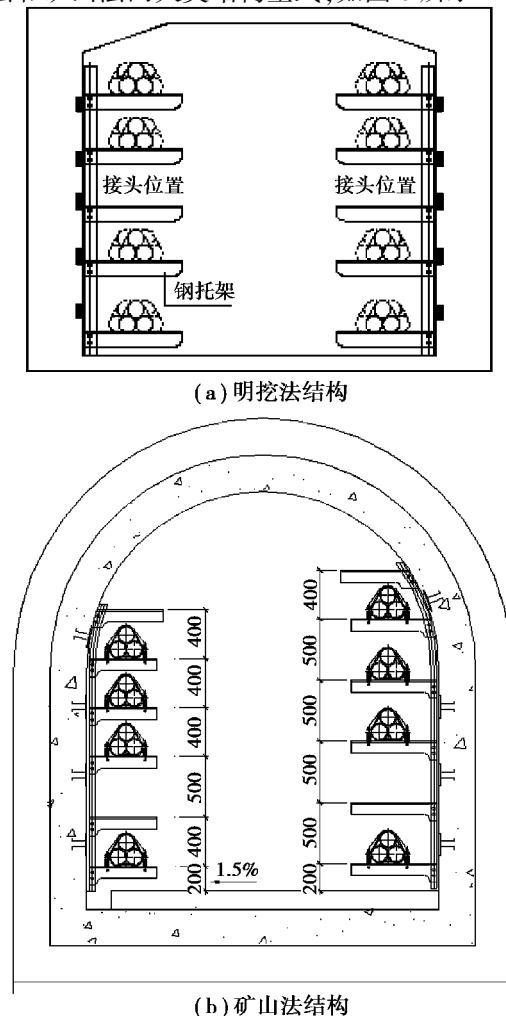


图6 现浇电力隧道衬砌结构型式

Fig. 6 Compositions of the cable tunnel

明挖法电力隧道常见的结构参数为:结构为箱形,内部净空往往为 2.8 m(高)×2.5 m(宽)、结构厚度约 30~40 cm;埋置深度不大时(顶板覆土 3~4 m)多为放坡开挖后回填,埋置深度较大或者周边环境条件复杂的情况下结构外侧有围护结构;通常采用外包防水卷材的方式进行防水。

矿山法电力隧道常见的结构参数为:结构多为直墙拱形,内部净空往往为 3.6 m(高)×2.5 m(宽)、初期支护及二衬厚度均约为 30 cm;可能设有超前支护、钢拱架、地层注浆、锚杆等措施;通常在初支和二衬之间设有防水板进行全包防水。

在隧道纵向上通常每隔一定长度设置环向施工缝和变形缝,在隧道结构上还会存在水平施工缝,以上接缝在隧道内部通过观察可以确定。另外还会布置通风井、检查孔、人员出入口、投料口等附属设施。

2.3 电力隧道工作环境条件分析

电力隧道内主要布设电力电缆(如图 7),电缆规格以 220 kV、110 kV、10 kV 等较为常见,并布置有监控、消防、火灾报警、防爆、通风、照明、抽水等设备及防火分区。电力隧道内部的电缆及设施较多,其内部的空间一般仅可以满足检修人员通行要求^[12]。



图 7 电力隧道内部设施情况

Fig. 7 Facility installation inside the cable tunnels

电力电缆及其他电力设施对水非常敏感,尽管高压电缆本体已采取了多道防水措施,但如果积水淹没电力电缆(尤其是电缆接头部位),仍然可能会造成运营事故和损失^[12]。隧道内渗水、返潮等情况会造成隧道内其他设备的腐蚀、短路等问题。

综上分析,电力隧道中的工作环境条件主要是要求尽量干燥无水,才能保证电力电缆和各项设备设施正常运转。

2.4 电力隧道病害处治需求分析

电力隧道目前主要的病害处治工作可以分为渗漏治理、结构加固、耐久性修复三大方面。其中,渗水堵漏主要是为保证隧道内电缆和设备设施的正常运营和节约抽排水费用;结构加固则主要是保证衬砌结构稳定,为设备运行提供一个安全稳定的空间;耐久性修复则是延长隧道结构的使用年限。由于各地电力隧道修建历史往往不久,因此,目前在许多城市的电力隧道维护工作中以渗漏治理为主,对于一些老旧的电力隧道则需要进行结构加固和耐久性恢复作业。

3 电力隧道结构病害检测内容与方法

一般情况下,在电力隧道养护部门所进行的简单日常巡查之外所开展的检测内容可以分为外观检查、结构安全性检查、结构耐久性检查这三大类,其中外观检查为必须首先进行的基础内容。

3.1 外观检查

外观检查是电力隧道检测工作中必须首先开展的环节,也是病害处治的基本依据。根据外观检查的结果,还可以在此基础上明确后续结构安全性检查、结构耐久性检查中各项内容的范围、数量。

外观检查主要通过目测和量测的方式进行,检查衬砌破损的表观病害和渗水初步调查、排水设施、预埋件等的完好程度(如表 1 所示),以系统掌握结构病害的基本情况。外观检查的结果通过现场填表、拍照、绘制病害展示图等方式进行记录,之后转成 AutoCAD 文档进行展示(示例如图 8)。

表 1 电力隧道外观检查内容

Table 1 Appearance inspection for cable tunnels

项目	内容
衬砌破损	衬砌裂缝的位置、宽度、长度、范围或程度; 施工缝及变形缝的开裂宽度、错位量; 衬砌表面起层、剥落的范围或深度; 底板拱起、沉陷、错台、开裂的范围和程度
渗漏水	衬砌渗漏水的位置、形态、积水情况
排水设施	结构缺损程度,排水沟开裂漏水状况; 排水沟、积水井等淤积堵塞、沉沙、滞水、结冰等状况
预埋件	预埋件是否破损、松动; 预埋件锈蚀情况

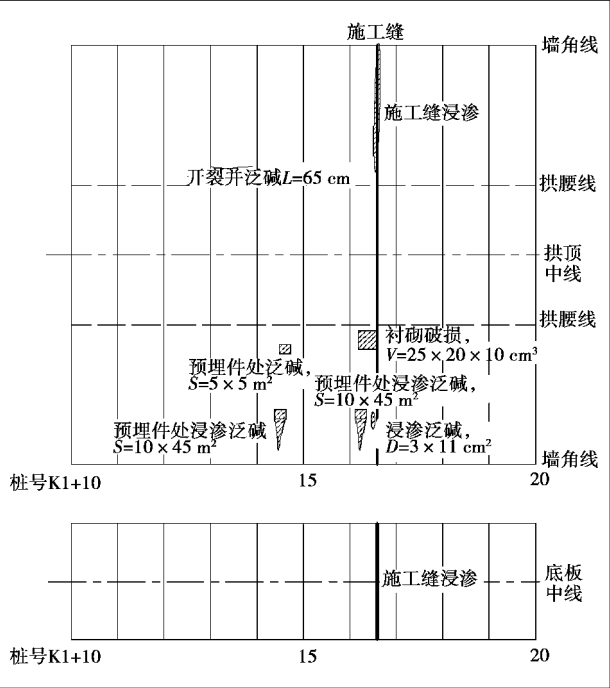


图 8 电力隧道病害展示图

Fig. 8 Defect display drawing of cable tunnel

3.2 结构安全性检查

在现场踏勘或外观检查可以确定电力隧道结 是否需要 进行结构安全性检查。为综合评定隧道 结构的安全性,结构性检查的内容往往较多,包括 衬砌及围岩状况检查、裂缝检测、净空断面检查等。

(1)衬砌及围岩状况检查:采用地质雷达进行 该项检测,检测结果可以对隧道衬砌厚度、衬砌背 后空洞、钢筋配置甚至周边围岩情况进行较为准确 的判定^[10]。电力隧道中通常可以只布设拱顶、底 板、左右边墙 4 条测线,其中左右边墙测线在扫描 时还需注意避让边墙上的电缆托架位置。

(2)净空断面检查:隧道的净空断面变化可以 反映出衬砌结构的受力变形情况,可以在隧道衬砌 裂损集中或变形严重的部位及前后区段进行该项 测定,以结合衬砌病害情况分析衬砌结构的稳定 性。但是由于受空间和设施的限制,无法在电力隧 道中采用激光断面仪进行净空扫描,因此,往往以 激光测距仪等简易设备测定隧道断面的净高、净 宽值。

(3)其他内容:其他一些隧道结构安全性检查 的专门项目还包括裂缝检查、衬砌应力及拱背压力 检查、水压力检查内容^[11],应根据待检隧道的表观 病害、病害处治目的等要求进行选取。

3.3 结构耐久性检查

目前对于隧道结构耐久性的评价方法主要有

碳化寿命准则、锈胀开裂寿命准则、裂缝宽度与钢 筋锈蚀量限值寿命准则和承载力寿命准则等^[15], 可以根据待检电力隧道的情况选用其中一种或者 集中评价准则对隧道的耐久性进行评定。

通常情况下,隧道耐久性检测项目应包括:

(1)侵蚀性环境因素调查:包括对隧道内的温 度、相对湿度、CO₂ 浓度以及水质分析的测定,对隧 道环境作用等级进行分析和判断。

(2)钢筋锈蚀:包括钢筋位置和保护层厚度以 及钢筋锈蚀量等项目测定,可以通过钢筋扫描仪、 钢筋锈蚀测试仪等测定。

(3)混凝土劣化:包括混凝土强度、碳化深度、 氯离子含量等项目测定,其中混凝土强度目前所采 用的方法主要为超声-回弹综合法进行检测推 定^[14],必要时通过钻芯法进行修正。

3.4 检测设备仪器

此处列出电力隧道检测中部分常用的设备仪 器,如表 2 所示。

表 2 电力隧道检测所需仪器设备

Table 2 Equipment for the inspection of cable tunnels

项目名称	检查内容	检测设备
外观检查	各项内容	钢卷尺、裂缝宽度比对卡等
	结构变形	断面扫描仪、测距仪
结构安全 性检查	衬砌及周围 地层状况	地质雷达
	裂缝检测	裂缝综合检测仪
	环境条件	CO ₂ 分析仪、温湿度计
	水质分析	温度计、pH 试纸、化学试剂
结构耐久 性检查	钢筋锈蚀	钢筋锈蚀测试仪、钢筋扫描仪
	混凝土劣化	回弹仪、非金属超声波仪

4 电力隧道结构病害检测结果评定

目前尚无电力隧道适用的结构病害检测和评 定规范,因此需要对检测结果的评定方法和标准进 行探讨。可以将隧道病害区域划分一定长度的区 段,分段、分项进行评定,此处可以部分借鉴公路隧 道定期检查的方法^[11],将电力隧道的各项检查结 果均划分为 5 级以确定各自类别,最后再确定各隧 道区段的综合技术状况等级。

4.1 隧道外观检查结果评定标准

电力隧道外观病害可以对运营使用和对结构 安全的影响程度两个方面进行综合评定,评定标准

见表 3, 主要以定性的方法确定各隧道区段的类别。

表 3 电力隧道结构外观病害分类评定标准
Table 3 Classification of the outer defects of cable tunnel

等级分类	评定因素	
	对运营使用的影响	对结构安全的影响
1	无影响	无影响
2	目前尚无影响	目前尚无影响
3	将来会影响	将来会影响
4	已经妨害	已经妨害
5	严重影响	严重影响

4.2 隧道结构安全性检查结果评定标准

安全性检查结果可以根据结构裂损情况对各隧道区段分别进行评定, 评定标准如表 4 所示, 主要以定性的方式确定。

表 4 电力隧道结构安全性分类评定标准
Table 4 Classification of the structural safety of cable tunnel

等级分类	结构裂损情况
1	结构无裂损、变形和背后空洞
2	出现变形、位移、沉降和裂缝, 但无发展或已停止发展
3	出现变形、位移、沉降和裂缝, 发展缓慢, 边墙衬砌背后存在空隙, 有扩大的可能
4	出现变形、位移、沉降, 裂缝密集, 出现剪切性裂缝, 发展速率较快; 边墙处衬砌压裂, 导致起层、剥落, 边墙混凝土有可能掉下; 拱部或顶部背面存在大的空洞, 上部落石可能掉落至顶部拱背
5	衬砌结构发生的永久变形, 裂缝密集, 出现剪切性裂缝, 裂缝深度贯穿混凝土, 并且发展快速; 由于拱顶裂缝密集, 衬砌开裂, 导致起层、剥落, 混凝土可能掉下; 衬砌拱部背面存在大的空洞, 且衬砌有效厚度很薄, 空腔上部可能掉落至拱背

4.3 隧道结构耐久性检查结果评定标准

耐久性检查结果可根据结构材料劣化情况对各隧道区段进行评定, 评定标准如表 5 所示。此处需要对耐久性检测项目的结果进行分析或计算, 如将混凝土碳化侵蚀寿命预测与隧道的初始设计使用年限进行对比, 以确定隧道结构的耐久性等级类别。

表 5 电力隧道结构耐久性分类评定标准
Table 5 Classification of the structural durability of cable tunnel

等级分类	结构材料劣化情况
1	环境条件和水质无侵蚀性, 材料无劣化
2	环境条件和水质有一定侵蚀性, 存在材料劣化, 钢筋局部腐蚀, 衬砌强度无降低
3	环境条件和水质侵蚀性明显, 材料劣化明显, 钢筋表面全部生锈、腐蚀, 衬砌强度有所下降, 结构物功能可能受到损害
4	环境条件和水质侵蚀性突出, 材料劣化严重, 钢筋断面因腐蚀而明显减小, 断面强度有相当程度的下降, 结构功能受到损害
5	环境条件和水质侵蚀性非常突出, 材料劣化非常严重, 断面强度明显下降, 结构物功能损害明显

4.4 隧道结构综合技术状况评定

对各区段隧道结构病害进行综合技术状况评定, 可以选取各隧道区段中外观检查、结构安全性检查、结构耐久性检查的评定分类结果中的最大值, 作为隧道区段的综合技术状况类别, 以保证各隧道区段的综合技术状况评定结果能反映该区段中的最严重病害程度。因此, 可以将电力隧道的养护等级也对应分为 5 级(如表 6 所示), 以根据隧道区段的综合技术状况评定等级采取相应的养护措施。

表 6 电力隧道结构养护等级及措施
Table 6 Classification of maintenance and measures of cable tunnel

养护等级	养护措施
1	正常养护
2	正常养护或预防性维修
3	预防性维修或局部实施病害处治
4	尽快实施病害处治
5	对电缆进行临时保护并及时实施病害处治

如表 6 所示, 电力隧道的维修养护措施可分为正常养护、预防性维修、病害处治三类: 正常养护是对隧道进行经常性和周期性的清扫和简单维护, 主要措施有清除洞内积水、水沟积砂清理、排水设施的维护等; 预防性维修是对暂时不影响隧道正常运营的病害进行简单处理, 以防止其继续发展, 主要措施有渗水引排、细微裂缝封闭、墙面湿渍及混凝土表面缺陷处理等; 病害处治是对严重影响隧道正

常运营的病害进行专项处理,以恢复隧道使用功能和结构安全,主要措施有渗漏水处理、结构裂损处理、混凝土劣化处理等。

5 结论

针对电力电缆隧道结构病害的常见类型、检测信息需求、检测内容与方法、检测结果评定标准等内容进行了分析和探讨,结论如下:

(1)电力隧道中常见的结构病害主要为隧道渗漏水、衬砌结构裂损、衬砌结构腐蚀这三大类,其中对电力隧道安全运营影响最大的往往是隧道渗漏水病害,这通常是隧道整治的重点。

(2)对电力隧道结构病害进行检测时,需要结合电力隧道的运营工作环境条件、功能特点、病害处治需求等因素,有针对性地在检测中收集和调查相关的信息和资料,为检测方案的制订和检测工作开展奠定基础。

(3)电力隧道结构病害检测的内容通常可以划分为外观检查、结构安全性检查、结构耐久性检查这三大类,可根据检测目的、隧道病害情况选取适宜的检测内容,并采用对应的方法和仪器设备进行检测。

(4)电力隧道检测结果的评定可以先划分为各个隧道区段,以定性的方式依次确定隧道区段分项技术状况值及综合技术状况分类,以采取对应的分类养护措施。

参考文献(References)

- [1] 国家能源局. 电力电缆隧道设计规程(DL/T 5484-2013)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014. (National Energy Administration. Code for design of power cables tunnel(DL/T 5484-2013) [S]. Beijing: China Jihua Press, 2014. (in Chinese))
- [2] 倪镭, 杜一鸣, 周质炎, 等. 上海世博会电力电缆隧道工程设计综述[J]. 特种结构, 2009, 26(6): 7-10. (Ni Lei, Du Yiming, Zhou Zhiyan, et al. Review on the design of power cable tunnel project for Shanghai EXPO[J]. Special Structure, 2009, 26(6): 7-10. (in Chinese))
- [3] 周健. 广州城区电力电缆隧道建设发展综述[J]. 低碳世界, 2015(33): 17-19. (Zhou Jian. Review on the development of the power cable tunnels in Guangzhou City[J]. Low Carbon World, 2015(33): 17-19. (in Chinese))
- [4] 王娟娟, 袁伟衡, 刘月, 等. 北京市既有电力隧道发展现状与常见灾害分析[J]. 工程安全, 2016, 34(11): 75-78. (Wang Juanjuan, Yuan Weiheng, Liu Yue, et al. Development present situation and the analysis of common disasters of existing electric power tunnel in Beijing[J]. Construction Security, 2016, 34(11): 75-78. (in Chinese))
- [5] 田强, 薛国州, 田建波, 等. 城市地下综合管廊经济效益研究[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增2): 373-377. (Tian Qiang, Xue Guozhou, Tian Jianbo, et al. Economic benefits research of urban utility tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 11(Supp.2): 373-377. (in Chinese))
- [6] 阚绍德. 电力隧道工程与地铁工程共建设计浅析[J]. 广东土木与建筑, 2014(12): 53-55. (Kan Shaode. Brief analysis for the co-construction of the electric power tunnel engineering and the subway engineering [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2014(12): 53-55. (in Chinese))
- [7] 刘丽娟, 许真宁, 唐云华. 成都地区电力隧道浅埋暗挖施工工法探讨[J]. 市政技术, 2013, 31(5): 77-79. (Liu Lijuan, Xu Zhenning, Tang Yunhua. Discussion on shallow excavation construction of power tunneling in Chengdu [J]. Municipal Engineering Technology, 2013, 31(5): 77-79. (in Chinese))
- [8] 陈孝湘, 李广福, 吴勤斌. 电力电缆隧道结构常见病害分类及防治[J]. 电力勘测设计, 2015(2): 10-14. (Chen Xiaoxiang, Li Guangfu, Wu Qinbin. Classification and prevent method of common diseases in the electric power tunnel[J]. Electric Power Survey & Design, 2015(2): 10-14. (in Chinese))
- [9] 程姝菲, 黄宏伟. 盾构隧道长期渗漏水检测新方法[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 733-738. (Cheng Shufei, Huang Hongwei. Monitoring methods of long-term water seepage in shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 733-738. (in Chinese))
- [10] 徐坤, 王志杰, 周艺, 等. 基于地质雷达技术隧道安全性评价研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 691-696. (Xu Kun, Wang Zhijie, Zhou Yi, et al. Evaluation of tunnel safety based on geological radar technology[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(3): 691-696. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国交通部. 公路隧道养护技术规范(JTG H12-2015)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical specification of maintenance for highway tunnel (JTG H12-2015.) [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))

- [12] 张瑛, 张屹, 王承. 电力隧道结构特点及常见病害分析[J]. 供用电, 2011, 28(2): 67-69. (Zhang Ying, Zhang Yi, Wang Cheng. Analysis on the power tunnel structure features and its common diseases [J]. Distribution & Utilization, 2011, 28(2): 67-69. (in Chinese))
- [13] 李海, 叶菲菲, 杨雨冰, 等. 电力隧道渗漏水成因分析及控制技术[J]. 华东电力, 2011, 39(8): 1311-1313. (Li Hai, Ye Feifei, Yang Yubin, et al. Cause analysis on water leakage in electric power tunnel and its control technology [J]. East China Electric Power, 2011, 39(8): 1311-1313. (in Chinese))
- [14] 中国工程建设标准化协会. 超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程(CECS 02:2005)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005. (China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for detecting strength of concrete by ultrasonic-rebound combined method[S]. Beijing: China Planning Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 唐孟雄, 陈晓斌. 城市地下混凝土结构耐久性及寿命评估[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Tang Mengxiong, Chen Xiaobin. Durability and lifetime evaluation of the urban underground concrete structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))

(上接第302页)

- [20] 张永杰, 李侑军, 李邵军, 等. 边坡模糊可靠性分析隶属函数取值界限研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1157-1163. (Zhang Yongjie, Li Youjun, Li Shaojun, et al. Study of boundaries of membership function values for slope fuzzy reliability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1157-1163. (in Chinese))
- [21] 龚文惠, 王元汉, 郑俊杰. 基于模糊理论的膨胀土路基沉降的可靠度分析[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(3): 50-53. (Gong Wenhui, Wang Yuanhan, Zheng Junjie. Reliability analysis on settlement of expansive soil roadbed based on fuzzy theory [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(3): 50-53. (in Chinese))
- [22] 孙杰, 张晓, 牟在根. 不同隶属函数对地下连续墙模糊可靠度影响的分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 838-840. (Sun Jie, Zhang Xiao, Mu Zaigen. Analysis of effect of different membership function on calculation of fuzzy reliability in underground continuous wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 838-840. (in Chinese))
- [23] 郑俊杰, 徐志军, 刘勇, 等. 基于最大熵原理的基桩竖向承载力的可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1643-1647. (Zheng Junjie, Xu Zhijun, Liu Yong, et al. Reliability analysis for vertical bearing capacity of piles based on the maximum entropy principle [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1643-1647. (in Chinese))
- [24] 章光, 朱维申, 白世伟. 计算近似失效概率的最大嫡密度函数法[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 119-129. (Zhang Guang, Zhu Weishen, Bai Shiwei. A method of maximum entropy density function for calculation of approximate failure probability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 119-129. (in Chinese))
- [25] 赖雄鸣, 王成, 张勇, 等. 最大嫡法在可靠度计算中的应用[J]. 计算力学学报, 2015, 32(1): 41-47. (Lai Xiongming, Wang Cheng, Zhang Yong, et al. Application of maximum entropy method in reliability computation [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(1): 41-47. (in Chinese))
- [26] 李军, 李亮亮. 承压水地层基坑坑底压拉突涌评价与物理试验[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 670-674. (Li Jun, Li Liangliang. Compression-tension failure evaluation and physical experiment for confined water foundation pit intruding [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 670-674. (in Chinese))
- [27] 吴奇, 李俊才. 高承压水基坑降水对周边环境的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增1): 365-372. (Wu Qi, Li Juncan. Analysis on impact of high confined water foundation pit dewatering on the surrounding environment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Suppl. 1): 365-372. (in Chinese))