

高速公路隧道结构安全性养护研究

韩飞

陕西交通控股集团有限公司宝天分公司，陕西 宝鸡 721000

DOI:10.61369/ERA.2025080012

摘 要： 隧道结构作为高速公路的关键节点，指为穿越山体、江河或城市地下空间而修建的带状管状交通构筑物。隧道结构由主体结构、附属结构两大部分构成，承担着重要的功能，也面临着较高的安全风险。安全性养护是防范高速公路隧道结构安全风险的关键，对此，应围绕构建隧道结构安全性评估体系、健全隧道结构安全性养护制度、做好隧道结构病害的处置、推广预防性养护技术、加强数字技术的应用五个方面，采取安全性养护措施，防范高速公路隧道结构安全风险。

关 键 词： 高速公路；隧道结构；安全性养护

Research on Safety Maintenance of Expressway Tunnel Structures

Han Fei

Baofen Branch of Shaanxi Communications Holding Group Co., LTD. Baoji, Shaanxi 721000

Abstract： Tunnel structures, as key nodes of expressways, refer to strip-shaped tubular traffic structures built to pass through mountains, rivers or urban underground Spaces. The tunnel structure is composed of two major parts: the main structure and the auxiliary structure. It undertakes important functions and also faces relatively high safety risks. Safety maintenance is the key to preventing the safety risks of expressway tunnel structures. To this end, safety maintenance measures should be taken from five aspects: establishing a safety assessment system for tunnel structures, improving the safety maintenance system for tunnel structures, properly handling tunnel structure diseases, promoting preventive maintenance technologies, and strengthening the application of digital technologies to prevent the safety risks of expressway tunnel structures.

Keywords： expressway; tunnel structure; safety maintenance

引言

改革开放后，随着社会经济的发展，我国现代化、城市化水平持续提升，城市人口急剧增长的同时，交通出行需求激增。高速公路是现代城市交通体系的重要组成部分，隧道结构则是高速公路中安全风险高发的区域。安全性养护，不仅能够延长隧道结构的使用寿命，也能防范隧道结构的安全风险，对于高速公路的运营有着重要意义^[1]。因此，要做好高速公路隧道结构安全性养护。

一、构建隧道结构安全性评估体系

安全性评估是隧道结构安全性养护的第一步，能够准确反映隧道结构安全现状，为安全性养护的开展提供支持。应深刻认识到安全性评估在隧道结构安全性养护中的价值，围绕评估指标的选择、评估方法的采用、评估流程的优化等多个方面，构建隧道结构安全性评估体系。

1. 科学选择评估指标。评估指标是安全性评估的依据，评估指标是否系统、合理，对评估结果的准确性有着直接的影响。应结合隧道结构常见的安全风险，围绕结构性能、防水系统、环境荷载等多个方面，选择评估指标，构建安全性评估指标体系。

以结构性能为例，结构性能主要反映的是隧道结构的承载能力，涉及到的指标包括但不限于衬砌裂缝、衬砌厚度、衬砌背后脱空率、仰拱隆起量、钢筋锈蚀率等。

2. 合理选用评估方法。将定量评估作为隧道结构安全性评估的主要方法，根据安全性评估的指标体系，通过基于专家打分的层次分析法，明确各指标的权重，再在单一指标评分的基础上，采用加权求和的方式，得出总分。将评分结果由高到低分为 I 级、II 级、III 级、IV 级四个等级，I 级指无显著病害，结构性能达标，IV 级指结构严重劣化，需立即封闭维修。

3. 推进评估流程的标准化。遵循数据采集→状态诊断→等级评定→结果应用的思路，推进评估流程的标准化。数据采集，即

通过传感器、无人机巡检等，多维获取安全性评估所需的数据，为评估工作的开展提供数据支持。状态诊断指通过数据分析，研判隧道结构的安全状况，识别、诊断隧道结构的安全风险。等级评定指从评估指标出发，根据数据分析的结果，应用评估模型计算综合得分，输出安全等级报告。结果应用指将评估结果作为安全性养护的参照，根据评估结果，制定差异化的养护方案，Ⅲ级隧道纳入年度加固计划、Ⅳ级隧道启动应急维修。

二、健全隧道结构安全性养护制度

“没有规矩，不成方圆”，制度建设是高速公路隧道结构安全养护的根本保障。对此，要围绕责任人工、养护要求、监督考核、应急管理四个方面，健全隧道结构安全性养护制度，助力隧道结构安全性养护的高质量开展。

（一）合理划分责任

高速公路隧道结构安全性养护涉及到业主、养护单位以及检测机构等多个主体。合理划分责任，不仅能够有效减少推诿扯皮的问题，也能实现各主体在安全性养护中的协同效应。从业主的角度而言，业主应统筹制定养护规划，审批评估报告与养护方案，并做好养护资金的监督管理。从养护单位的角度而言，作为安全性养护的实际责任人，养护单位应做好日常巡检、定期检测等工作，并将检测结果及时上报。从检测机构的角度而言，检测机构应以独立、公正的态度，做好专项评估，为隧道结构的安全性养护提供智力支持。

（二）明确养护要求

系统、完善、清晰的养护要求，不仅能够为养护工作的规范化开展提供依据，也能提高养护工作质量。应围绕日常巡检、定期检测、专项检测等，出台隧道结构安全性养护操作规程，明确操作要求与阈值。以日常巡检为例，日常巡检是最为基本的养护方式，频率以一周一次为宜，巡检内容包括路面有无隆起、破损现象，衬砌表面有无裂缝、掉块现象，排水系统有渗漏水或盲管堵塞的现象等。巡检人员要实时上传照片、位置，准确描述并及时上报病害。

（三）完善监督考核机制

以内外结合的方式，开展隧道结构安全性养护的考核监督，内部考核监督以业主单位为主体，通过每月抽查养护记录、每季度组织专家现场复核的方式，检查隧道结构安全性养护的情况，外部考核监督以交通主管部门为主体，主要核定隧道结构的安全等级，并根据安全等级，对养护单位评分。同时，出台责任追究机制，对因养护失职导致事故的单位或个人，严格追溯责任。

（四）构建应急管理制度

隧道结构安全问题一旦发生，危害极大。应急预案对于隧道结构安全事件的处理具有重要的作用。应结合近年来隧道结构常见的安全问题，如分门别类制定应急预案。同时，加强应急预案的演练工作，组织养护人员在闲暇时期，开展专项安全事件应急预案演练，提高全体人员的应急管理意识以及应急处置能力。

三、做好隧道结构病害的处置

受设计不当、养护缺位、环境侵蚀等多重因素的影响，高速公路隧道结构易出现各种形式的病害。隧道结构病害严重危害通行安全，因此，做好隧道病害的处置，就成为高速公路隧道结构安全性养护的重点。

（一）衬砌开裂

早期的衬砌开裂以宽度在0.2mm以内的发丝状微裂缝为主，若不及时干预，裂缝会沿着环向、纵向拓展，并伴有混凝土剥落、掉块。导致衬砌开裂的因素有很多，如设计时，衬砌厚度不足或衬砌结构形式与实际地质情况不匹配。针对衬砌开裂的问题，应在应急修补的基础上，做好结构加固，即先采用环氧树脂对微裂缝进行注浆封闭，再根据衬砌开裂的原因，采取针对性的结构加固措施。

（二）渗漏水

渗漏水指隧道结构内存在点漏、线漏或面漏的问题。渗漏水会严重降低隧道结构的安全性。从短期的角度而言，渗漏水会降低路面摩擦力，冬季严寒季节，更会导致挂冰问题，增加通行事故风险，从长期的角度而言，渗漏水会加速钢筋锈蚀、混凝土碳化等问题，影响隧道结构的使用寿命。应在堵水、排水的基础上，通过整体喷涂水泥基渗透结晶型防水涂料或局部更换破损防水板，进行防水修复。

（三）路面隆起

路面隆起指隧道结构路面受围岩膨胀、基底软化、施工缺陷等因素的影响，出现局部隆起、开裂的问题。隧道结构内空间有限，路面隆起会导致行车颠簸，引发车辆失控，造成安全事故。对隆起高度在5cm以内的区域，可采用切割打磨的方式，使路面平整，再根据路面隆起的原因，制定根治修复方案。以围岩膨胀导致的路面隆起为例，可开挖隆起段路面及基层，置换膨胀性围岩。

（四）钢筋锈蚀

钢筋是隧道结构的重要材料，钢筋锈蚀也是隧道结构常见的安全问题。钢筋钝化膜是在氧化条件下通过强阳极极化而形成的一层具有阻碍腐蚀作用的保护膜，然而，受混凝土碳化的影响，钝化膜存在被破坏的风险，同时，地下水或冰盐的渗透，也会加速钢筋电化学反应能够，导致钢筋锈蚀。锈蚀会导致钢筋力学性能的退化，危害隧道结构安全。应通过表层处理、修复加固、长期防护，来防范、处置钢筋锈蚀问题，保障隧道结构的安全性。

四、推广预防性养护技术

预防性养护是高速公路隧道结构安全性养护的重点。所谓预防性养护，指在衬砌开裂、渗漏水等显著病害出现前采用的养护措施。预防性养护具有重要作用，不仅可以有效降低隧道结构的安全风险，保障通行安全，也能延长隧道结构的使用寿命^[3]。对此，应围绕防水系统、衬砌结构、环境三个维度，采取好策略。

（一）防水系统维护

防水系统是隧道结构的重要组成部分，排水盲管堵塞、防水

板破损等问题，也是导致隧道结构渗漏水问题的主要原因。应做好防水系统的周期性检测，综合采用地质雷达、红外热像仪等工具，研判防水系统情况，如以地质雷达探测初期支护与二次衬砌间防水板的完整性，锁定破损点。针对检测中暴露出来的问题，应采取针对性的修复措施。以防水板局部破损为例，可采用粘贴丁基橡胶止水带的方式，来修复破损。对大面积的破损，可采用热风焊枪补焊。对富水段或已出现渗漏水历史的隧道，可增设辅助排水系统，实现排水系统的整体优化。

（二）加固衬砌结构

混凝土微裂缝、脱空、钢筋局部锈蚀等初期劣化，是导致隧道结构整体性风险的主要因素。可通过加固衬砌结构的方式，来遏制病害发展，保障隧道结构安全性。混凝土碳化和多种病害相关，而延缓混凝土的碳化速率，则是预防性养护的重点^[2]。可喷涂硅烷浸渍剂，确保渗透深度在3mm以上，在混凝土表面形成憎水膜。针对衬砌背后脱空的问题，可用水灰比在0.4-0.5的低收缩水泥浆，进行注浆填充，规避衬砌结构脱空导致的开裂问题。

（三）做好环境控制

环境侵蚀是高速公路隧道结构病害由小变大，酿成安全事故的重要因素。应从温度、湿度以及化学腐蚀等方面，做好隧道结构的环境控制。温度控制要根据隧道结构所在的地区环境进行，对高温地区，应在衬砌表面涂刷反射隔热涂料，降低混凝土内外温差，防范温差大导致的温度应力裂缝。对低温地区，可在排水沟内设置保温层，预防冬季渗漏水结冰。湿度控制主要为风机、风管等通风设备的检查、清理与优化，能够降低隧道内的相对湿度，减少混凝土表面冷凝水。

五、加强数字技术的应用

在数字技术不断发展与广泛应用的今天，人类社会已经步入数字时代。高速公路养护也向着数字化转型的方向迈进。数字技术在高速公路隧道结构安全性养护中有着广阔的应用价值，不仅可以提升隧道结构安全性的态势感知能力，也能推动隧道结构安全性养护的智能化发展。因此，要多维加强数字技术在隧道结构安全性养护中的应用。

（一）以无人机巡检提高巡检水平

巡检是隧道结构安全性养护的重要内容，传统的巡检，以人

工巡检为主，面临着盲区多、效率低、安全性差等问题。搭配高清摄像头、红外热像仪以及激光雷达的无人机，在隧道结构巡检中有着突出的优势。应在隧道结构巡检中，大力推广无人机，发挥好专业设备在裂缝、衬砌内部脱空等病害巡检中的作用，同时，将巡检数据，导入分析平台，形成标准化数据库，为后续的数据分析与应用奠定坚实基础。

（二）以BIM模型推进可视化管理

BIM（Building Information Modeling）能够隧道结构数据采集的基础上，生成三维模型，从而助力隧道结构的可视化管理。不同阶段的数据集成，如设计阶段的围岩分级、衬砌厚度、防水板类型，施工阶段的锚杆长度、注浆压，运营阶段的病害历史、修复记录等，是三维模型生成的基础。应在数据采集的基础上，做好数据集成，并结合巡查动态反馈的数据，依托三维模型，生成病害坐标、类型、发展态势等基本信息，为养护工作的开展提供依据。

（三）以人工智能技术推进智能化养护

人工智能以模拟和延展人类智能为主要特点，是养护智能化的关键。机器学习是人工智能的核心，主要研究机器对人类学习行为的模仿与实现，以使机器获取新的知识、技能，促使机器重新组织已有的知识结构使之不断改善。可结合数据，利用LSTM模型，对隧道结构病害进行预测。当前，以DeepSeek、Doubao、文心一言等为代表的生成式人工智能平台，在处于快速发展的阶段。可将相关数据以及安全性养护的需求，输入到生成式人工智能平台，自动获取养护方案，从而提高安全性养护的效率。

六、结束语

安全性养护是通过系统性技术手段，维持或恢复隧道结构性能、预防安全事故的全周期管理过程，对保障高速公路隧道结构的安全性具有重要的意义。要从安全性评估等多个方面出发，做好隧道结构安全性养护，提升隧道结构安全等级。

参考文献

- [1] 施章武. 高速公路桥梁与隧道养护管理现状与解决措施 [J]. 中文科技期刊数据库 (文摘版) 工程技术, 2025(01): 131-134.
- [2] 徐爽. 公路隧道钢筋混凝土二次衬砌施工技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2025(03): 118-121.
- [3] 张艺城. 高速公路隧道预防性养护技术的实践应用 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2025(01): 177-180.