

交通土建结构长寿命安全保障的途径分析

钱永久¹, 杜彦良²

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 石家庄铁道大学, 石家庄 050043)

摘要: 我国已建成了规模居于世界前列的交通基础设施, 但由于多种因素的影响, 交通基础设施重大结构的安全保障问题面临着越来越严峻的挑战。本文分析了我国交通基础设施的发展现状, 综述了国内外相关领域的研究进展, 讨论了我国交通基础设施重大结构长寿命安全保障领域存在的主要问题及实现安全保障的技术途径, 提出了实施安全保障计划应达到的目标以及需解决的关键问题。

关键词: 土建结构; 长寿命; 安全; 评估; 管理

中图分类号: U298.5 **文献标识码:** A

Analysis on Ways of Guaranteeing the Safety of Civil Structures in Traffic Systems during Long Service Lives

Qian Yongjiu¹, Du Yanliang²

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: China has built the largest scale traffic infrastructure in the world. Owing to many factors, the security of major structures is becoming extremely challenging. This paper analyzes the current development of China's transportation infrastructure, reviews research progress in related fields at home and abroad, discusses ways to guarantee the safety of the major civil structures during long service lives, and proposes the implementation objectives of a safety plan and key issues to be resolved.

Keywords: civil structure; long life; safety; evaluation; management

由道路、铁路、桥梁、隧道、地铁、机场等构成的交通基础设施是社会交通体系的重要组成部分, 也是社会的一笔巨大的固定资产, 具有社会公益性、经济先导性、网络经济性、规模经济性和军事战略性等基本属性。确保交通基础设施重大结构在设计寿命期的安全服役并尽可能延长其使用寿命, 充分发挥其基础性、先导性和服务

性功能, 对于支撑经济建设持续发展、保障人民生活安稳有序、助力国家和社会稳定, 具有十分重大的战略意义。

经过多年的发展, 我国交通基础设施建设取得了令人瞩目的成就。与世界其他工业化国家相比, 我国的交通基础设施建设总体表现出起步晚、速度快、强度大等特点。一方面, 因交通基础设施结构

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2017-11-22

通讯作者: 钱永久, 西南交通大学, 教授、博士生导师, 研究方向为既有工程结构的评估、诊断与加固理论, 桥梁结构设计理论等;

E-mail: yjqian@sina.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“交通基础设施重大结构安全保障战略研究”(2015-XZ-28)

本刊网址: www.enginisci.cn

的自然劣化、严峻的服役条件以及不足的养护维修等因素影响,一部分结构过早地出现了安全性不足、耐久性降低,适用性不强的状况,导致实际使用寿命远远短于期望的使用年限。随着时间的推移,我国大批的工程结构物老化的现象日益突出,部分重大结构也将陆续达到设计使用寿命,如何科学决策它们的归属或合理使用将是我国面临的一个重要问题;另一方面,修建结构时的高速度和高强度必然会集中反映到将来既有结构的维修加固上,届时将会给养护维修、交通运输和社会生活等带来巨大压力。

未来若干年,我国将通过体制、机制与科技创新系统解决交通土建结构长寿命安全领域的共性基础理论与方法问题,提升设计、施工、管理、运营与维护等方面的法规和标准,系统开展新材料、新技术、新结构、新装备、新工艺等领域的研究工作,培育适合我国交通基础设施建设与管理养护(管养)工作的新型产业体系,充分发挥重大交通基础设施的效能,服务国民经济建设,提升我国在该领域的国际影响力与竞争力。

一、现状分析

(一) 我国交通基础设施现状分析

截至 2015 年末,我国“五纵五横”综合运输大通道基本贯通,已建成的主要交通基础设施规模如下:全国公路总里程 4.6×10^6 km,其中高速公路里程为 1.3×10^5 km;全国铁路运营里程达到 1.24×10^5 km,其中,高速铁路运营里程超过 2.2×10^4 km;全国城市道路长度为 3.65×10^5 km,路面面积为 7.18×10^9 m²,人均城市道路面积为 15.60 m²;县城道路长度为 1.34×10^5 km,道路面积为 2.49×10^9 m²,人均城市道路面积为 15.98 m²;公路桥梁总数已达 7.79×10^5 座,已建成一批在国际上具有重要影响力的超级桥梁工程;铁路桥梁总数达到 6.5×10^4 座,其中高速铁路中长桥、高架桥、大跨度桥梁众多,桥梁所占线路比例达 50% 以上;运营公路隧道 11 359 座,总长 9 605.6 km(特长隧道 562 座、共计 2 500.69 km);运营铁路隧道 11 074 座,总长 8 938.78 km;全国已有 24 个城市建成轨道交通,线路长度为 3 069 km,车站数为 2 008 个 [1]。

总体来说,我国已建成了规模居于世界前列的交通基础设施,但由于受到各种因素的影响,重大结构的安全保障问题面临着越来越严峻的挑战。

我国交通基础设施重大结构的设计使用年限与实际使用寿命有显著的差异与不确定性。以桥梁工程为例,我国特大桥、大桥和重要中桥的设计寿命为 100 年(特殊桥梁可按 120 年设计),中桥、重要小桥的设计寿命为 50 年,小桥和涵洞的设计寿命为 30 年。在桥梁设计使用年限内,由于各类因素的影响,实际使用寿命会小于设计使用寿命,对桥梁结构的正常安全使用造成威胁。另外,由于受不同时期国情和经济条件的限制,新中国成立后修建的大量桥梁,其建设标准和建设质量存在较大的差异,总的趋势是实际荷载等级在不断增大,原有桥梁已难以适应当今运输的要求。

随着时间的推移,大量的交通基础设施重大结构也将陆续达到其设计使用寿命,并形成一笔巨大的“带有问题”的固定资产。若采用完全更换的方式往往是经济上不能承受的,有的在技术上也是难以实现的。比如,重要的城市地铁系统、大型桥梁隧道,即使其使用年限达到设计使用寿命,也难以及时更换或重建。在确保使用安全的情况下,这些结构仍将服役相当长的时间并发挥巨大的社会效益与经济效益。因此,如何在理论、技术、规范、政策和管理制度上保证这些老化结构(包括达到或即将达到设计使用寿命的结构)的可靠性与安全性,也是我们面临的严峻课题。

结构长期性能退化、材料老化与劣化对我国交通基础设施重大结构安全的影响日益突出。以桥梁与隧道为例,据统计,我国公路网中的危桥数量呈逐年递增趋势。2014 年,各类危桥数量高达 7.96 万座,约占公路桥梁总数的 10.5%,根据 2009 年铁道部秋检资料统计,我国铁路桥梁劣化等级达到 A 级(严重)以上病害的占总座数的 24.8%。在我国运营的 5 200 多座铁路隧道中,存在漏水、衬砌严重裂损及道床损坏等病害的隧道达 2 000 多座,发生病害的隧道长度约占隧道总长度的 10% [1]。隧道结构采用的混凝土或钢筋混凝土材料会由于隧道周围地下水含有侵蚀性物质以及机车排放废气侵蚀而导致混凝土腐蚀;氯离子侵蚀、混凝土碳化而发生钢筋腐蚀,硫酸盐侵蚀、碱集料反应及冻融、盐结晶破坏等多种形式

的电化学腐蚀，化学和物理破坏等导致我国铁路隧道裂损的现象十分严重。

设计与施工质量不达标是影响我国目前存量交通基础设施长寿命安全的重大隐患，也是目前重大事故发生的主要原因之一。如何科学诊断、评估、处置该类隐患将会是一项长期而艰巨的任务。众所周知，改革开放以来，由于我国基本建设超常规的发展，导致设计周期短且质量监控措施不到位、施工周期短且监理作用发挥不充分、材料质量参差不齐且检验措施不够严谨、对施工人员相应的技术培训缺失，导致所建结构存在不同程度的缺陷。以隧道为例，隧道结构中由于施工不规范造成的隧道衬砌结构裂损占 80% 左右，材料质量差或配合比不合理产生的裂损占 15% 左右，设计不当引起的裂损占 5% 左右 [1]。

超载与日常维修管理欠缺是影响重大结构损伤状态和实际使用寿命的重要因素。近年来，随着交通运输量的大幅增长和汽车的大型化与重型化，超载、超限运输现象十分严重，运输荷载大大超越结构的设计荷载和承受能力，长期超负荷运营导致结构发生开裂与损伤，严重缩短结构的使用寿命，危及结构的使用安全。据统计，我国公路每年因车辆超载、超限运输造成的经济损失约为 300 亿元，全国每年有 10 万人死于因超载导致的交通事故。以四川省为例，全省 40 万辆货运汽车 90% 以上存在超限、超载，超载程度普遍在核定吨位的 50%~200%，少数车辆超载甚至达到 300% 以上 [1]。

各类自然灾害与人为损害是重大结构使用安全的重大威胁。我国幅员辽阔，地理环境和气候条件复杂，自然灾害种类多、且发生频繁，大量修建的交通基础设施重大结构受台风、地震、泥石流、滑坡等自然灾害的影响巨大，同时，爆炸、冲击、火灾等人为灾害对结构安全的影响也不容忽视。

目前，我国仍处于交通基础设施建设快速发展时期，交通基础设施的安全保障呈现新内容、新形式和新特征。因此，迫切需要建立合理的安全风险预测评估和保障机制，以提高其抗风险能力，保证在运营期间的安全性。

（二）国外的一些相关研究与发展现状

美国公路运输网非常发达，约有 60 万座公路桥梁。从 1967 年 Sliver 桥倒塌开始，美国高度关

注桥梁的检测和养护，目前已经形成相对完善的桥梁检测、评估和维护加固体系，逐年减少了有缺陷的桥梁数量。2008 年美国联邦公路局（FHWA）的基础设施研究与发展署又发起了桥梁长期性能研究计划（LTBP），计划用 20 年时间，系统收集美国国家公路桥梁的相关数据，建立详细即时的桥梁健康数据库，开展桥梁结构性能理论和应用技术的研究，最终提高美国公路桥梁的安全性、可靠性和长寿命 [2]。

日本在 1964 年举办东京奥林匹克运动会时所建设的首都高速 1 号线以及在经济高速成长期建成的交通基础设施都将进入老龄化。例如，在今后 20 年，建造年龄超过 50 年的道路桥梁的比例将从目前的约 16% 达到约 65%，老龄化的比例正在加速增长。在这些基础设施中，存在众多维护管理信息（例如，建设年度、构造形式等设施要素，劣化、损伤的进展状况等）不明的设施，而且关于维护管理的标准、管理制度及体制也不十分健全 [3]。

未来若干年，日本将切实应对规模约 800 万亿日元的基础设施老龄化问题。以国家、地方公共团体以及其他民间企业等管理的所有基础设施为对象，策划制定了“基础设施长寿命化基本计划”。该计划要求日本全国各省厅及自治体必须制定整体的维持管理体制及中长期所需要的成本等行动计划，必须分别制定学校、道路、下水道等设施的检查、修缮计划，逐步实现构筑安全牢固的基础设施系统、实现综合性与一体化管理以及强化维修产业竞争力的预期目标 [3]。

英国通过公路机构对基础设施的发展与维护进行资产管理并开发出相应的管理系统，最近还宣布了近半个世纪以来最大的道路建设工程计划，即投资 150 亿英镑用于改善该国 100 多条主干道路 [4]。

二、交通土建结构长寿命安全面临的主要问题

交通土建结构长寿命安全保障问题主要涉及到两个方面的内容：一是确保量大面广的既有交通基础设施在预期设计使用寿命内安全可靠服役；二是对重大或重要结构在达到或超过其设计使用寿命之后，延长其服役年限并确保安全运营。重大结构长

寿命安全保障工作是一个系统工程,涉及政策法规、设计理论、评估与诊断理论、病害监测与检测、结构维修和加固理论与技术、施工工艺、材料、装备等,目前还缺乏必要而充分的研究。从现有的工程实践中,总结出重大结构长寿命安全领域存在的主要问题。

(1) 已有的设计缺乏对结构长寿命的系统考虑,包括相关的设计理论与建造方法还不成熟,构成了结构长寿命安全的隐患。

(2) 设计与施工质量的缺陷威胁着大量正在使用的既有结构的安全。

(3) 长期以来,我国交通基础设施领域重建、轻管养的状况普遍存在,对既有结构养护维修的缺失或系统性不足可能严重缩短结构的实际使用寿命。

(4) 公路系统中普遍存在的超载现象加剧了结构的损伤,同时缩短了结构的使用寿命。

(5) 遭受不同类型灾害作用后的结构会存在不同程度的损伤,尽管可能会进行加固维修,但损伤对结构长期使用安全的影响仍需要研究与评估。

(6) 对既有重大结构的剩余寿命评估缺乏必要的理论基础。

(7) 对服役期已达设计年限的重大结构,评估其继续安全服役的可行性理论与方法还有待研究。

(8) 现有检测与健康监控的技术与手段还需要做进一步的研究。

(9) 在实验室通过快速实验得出的耐久性结论不足以保证实际结构的长期性能。

(10) 对结构长寿命安全领域开展的系统研究工作不足,不利于既有结构的管理与维护,也对新结构的设计提出挑战。

三、交通土建结构长寿命安全保障的途径分析

基于对相关领域的国内外现状分析,为了更好地发挥我国存量巨大且资产庞大的交通基础设施为国民经济建设服务的功能,考虑到交通基础设施重大结构安全面临的严峻形势,同时其安全保障作为一项系统工程目前还缺乏长远规划与顶层设计,因此建议在我国开展“交通基础设施重大结构长寿命安全保障计划”。

(一) “交通基础设施重大结构长寿命安全保障计划”应达到的目标

针对我国的具体国情,通过体制创新、机制创新、科技创新和产学研相结合的方式,以满足经济社会发展和人民生命财产安全需求为目标,充分发掘既有基础设施服务国家经济发展的潜力,保持重大交通基础设施长寿命安全与综合造价控制的平衡,推进基础设施建设与信息化、工业化的深度融合,全面推行绿色制造,提高我国重大交通基础设施的安全性、适用性、可靠性和长寿命,培育适合我国交通基础设施建设与管养工作的新型产业体系,使我国在交通基础设施重大结构长寿命安全保障领域的设计、施工、建设管理等方面的综合能力达到世界先进水平,确保我国交通基础设施重大结构的安全,确保国家安全和人民群众的生命财产安全。

通过开展交通基础设施重大结构长寿命安全保障领域的研究与实践,构建基于勘察、规划、设计、建造、运营维护与管理的全寿命信息档案与管理体系,适应现代运营组织与管理的监控体系,大型结构性能改造与提升工程新型结构体系,应对不同自然灾害的大型结构应急抢修抢建与装备研发和应急救援组织管理体系;基于规划、设计、施工、运营、管养、拆除全过程,实现全寿命周期内总体性能(功能、成本、人文、环境等)最优的交通基础设施重大结构设计、建设与管理体系,确保我国交通基础设施重大结构不发生重大安全事故,为国民经济建设与发展提供有力的支撑。

具体来说,可以分三步来达到我们的预期目标。

(1) 全面掌握我国交通基础设施重大结构的建设现状并对未来的发展趋势进行预测。按交通基础设施重大结构分类,研究确定需要采集的数据,制定数据采样、采集和质量保证的标准,并系统收集相关数据。建立详细即时的结构健康数据库以及与之相关的开放的、可升级的、可扩展的数据管理和数据分析系统。通过系统分析采集到的相关数据,确定未来研究、监(检)测和评估所需要的典型的重大结构的类型、数量及位置,并制定相应的研究计划。这项工作预计用5年左右的时间完成。

(2) 系统开展关键技术领域方面的研究工作,包括长寿命安全领域的共性基础理论与方法研究,

结构长寿命安全评价及预警平台，重大结构系统预防性养护维修策略，结构检测与健康监测新型实用技术，重大结构长寿命安全保障技术，应急技术装备，新材料、新技术、新装备的研发与应用，长寿命安全保障的政策与法规的建立等。取得关键技术领域的突破，并建立相应的技术法规与规范。此项工作预计在 10 年之内完成。

(3) 构建适合我国国情的交通基础设施重大结构的长寿命安全保障系统，普及推广与之相关的新材料、新技术、新结构、新装备、新工艺、新规范、新制度，建立重大结构管养的标准体系，逐步培育新型产业体系和国民经济新的增长点，对重大工程结构实现可测、可检、可控、可修、可应急处置，充分发挥交通基础设施重大结构为国民经济建设服务的重大功能，并体现出重大的经济效益。此项工作预计在 20 年之内完成。

通过实施该项计划，可以达到如下具体目标：

①所有交通基础设施均应建立相应的长寿命安全保障标准化计划，并落实在日常管理工作之中；②培育重大结构长寿命安全保障领域的产业体系，其产业化实现的产值达到重大结构新建产值的 50%；③所有交通基础设施均可以使用新型传感器、机器人、非破坏性检测技术等，结合大数据、云计算的现代信息技术，高效地进行检查、检测、评估、修补或加固处置；④通过上述工作，使交通基础设施重大结构在可使用寿命内发生重大事故的概率显著降低；⑤结合国家“一带一路”战略，在沿线国家推广相关成果与技术。

(二)“交通基础设施重大结构长寿命安全保障计划”的战略任务和重点

具体来说，“交通基础设施重大结构长寿命安全保障计划”的战略任务和重点主要包含下列内容。

(1) 基于信息技术与大数据的大型工程结构数据库的建立，构建从勘察、规划、设计、建造到运营维护与管理的全寿命信息档案与管理系统；建立基于数据库和现代试验技术的结构劣化与剩余寿命预测模型，构建重大结构长寿命安全理论与方法，实现重大结构养护维修与加固对策制定的科学化。

(2) 基于现代传感技术、信息技术、结构评估技术的大型结构健康监测与安全控制体系的构建，

以及适应现代运营组织与管理的点、线、面、体监控体系的构建，推动适应大型工程结构的现代传感与监测仪器装备的研发及产业化。

(3) 基于新材料、新结构、新工艺的大型结构性能改造与提升工程及其产业化发展，用于延长使用寿命，提高承载力，形成新型结构受力体系。

(4) 应对不同自然灾害的大型结构应急抢修、抢建与装备研发和应急救援组织管理体系的构建。

(5) 基于信息化、网络化、智能化的现代运营组织管理与全寿命预防养护维修模式及自动化养护机械设备的研发，培育重大交通基础设施养护、维修、加固新型产业。

(6) 建立适应现代大型工程结构全寿命周期管理的政策、法规、技术标准和规范。

四、建议

交通基础设施作为社会的巨大固定资产，对国民经济建设具有极其重要的作用。我国既有的数量庞大的交通基础设施重大结构在其使用寿命内存在不同程度的、甚至是严重的安全隐患，随着时间的推移，大批的工程结构物老化与性能退化的现象日益突出，部分重大结构将陆续达到设计使用寿命。目前，我国仍处于交通快速发展时期，新建的众多交通基础设施体量巨大、结构复杂，而且随着服役期的不断增长，其安全性、耐久性及管理维护的问题日益增加，长寿命安全保障问题将会日益突出。

鉴于相关领域的理论、技术与管理体系的缺失或不足，世界各国特别是发达国家十分关注并正在实施重大结构长寿命安全领域的理论与技术研发，投入了巨额的资金并制定新的制度予以保证，试图占领该领域的制高点。

建议尽快在我国实施“交通基础设施重大结构长寿命安全保障计划”，通过全面掌握我国交通基础设施的建设现状，系统开展关键技术领域方面的研究工作，构建适合我国国情的相应技术体系和技术标准。该项工作对于确保我国交通基础设施重大结构的安全，确保国家安全和人民群众生命财产安全，确保交通基础设施这一庞大资产为国民经济建设服务并造福人民，同时培育新的产业体系和经济增长点，都将具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2016年交通运输行业发展统计公报 [R]. 北京: 中华人民共和国交通运输部, 2017.
Ministry of Transport of the PRC. Statistics report on transportation industry development in 2016 [R]. Beijing: Ministry of Transport of the PRC, 2017.
- [2] 朱从明, 张宇峰, 戴云峰. 美国桥梁长期性能研究计划及其启示 [J]. 现代交通技术, 2012, 9(2): 18–21.
Zhu C M, Zhang Y F, Dai Y F. American bridge long term performance research and its enlightenment [J]. Modern Transportation Technology, 2012, 9(2): 18–21.
- [3] インフラ長寿命化基本計画 [R]. インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議, 平成25年11月.
- [4] 吴文娟, 赵伟. 道路资产管理系统简介 [J]. 中外公路, 2012, 31(1): 253–258.
Wu W J, Zhao W. Brief introduction of road asset management system [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2012, 31(1): 253–258.