

水下隧道衬砌结构服役安全及其保障对策思考

何川, 刘四进, 张玉春, 封坤

(西南交通大学土木工程学院 交通隧道工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要: 本文从设计施工、环境侵蚀、突发自然灾害及突发事故灾害四个方面, 分析了我国隧道衬砌结构安全所面临的问题; 对上海地区黄浦江越江隧道和地下交通隧道等水下隧道工程进行了调查, 重点分析了我国在役水下隧道衬砌结构服役的现状。并基于此, 为有效保障隧道结构全寿命周期过程中的安全服役性能, 及预留隧道结构长寿命有效条件, 从隧道建设、结构性能退化、自然灾害、突发事故灾害等方面入手, 探寻我国水下隧道结构的长寿命安全保障对策, 以确保在隧道的全寿命周期内乃至长寿命要求下结构的安全服役性能。研究成果可为保障我国水下隧道等重大隧道结构的长寿命安全提供参考。

关键词: 水下隧道; 服役安全; 安全保障对策; 长寿命; 结构病害

中图分类号: U451⁺.4 **文献标识码:** A

Service Security of Underwater Tunnel Lining Structures and Corresponding Guarantee Countermeasures

He Chuan, Liu Sijin, Zhang Yuchun, Feng Kun

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper analyzes four aspects of the safety problems in tunnel lining structures: design and construction, environmental erosion, sudden natural disasters, and sudden accidents. A survey of underwater tunneling such as the Huangpu River's cross-river tunnel and the underground traffic tunnel in Shanghai was carried out, and the status quo of China's underwater tunnel lining structure was analyzed. Based on these analyses, countermeasures guaranteeing the long-life security of underwater tunnel structures are being sought regarding tunnel construction, structural performance degradation, sudden natural disasters, and sudden accidents. These countermeasures are being sought to effectively protect and ensure the service performance of the tunnel structures during their entire life cycle. These security measures can ensure the safe performance of the structure during its entire life cycle, even under long service times. This research can serve as a reference for enhancing the structural security of underwater tunnels and other major tunnel structures.

Keywords: underwater tunnels; service security; security guarantee countermeasures; long life; structural defects

收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2017-11-27

通讯作者: 何川, 西南交通大学, 教授、博士生导师, 主要从事隧道与地下工程领域的研究; E-mail: chuanhe21@163.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); 国家重点研发计划(2016YFC0802201); 国家自然科学基金资助项目(51578462)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

随着经济社会的快速发展、互联互通需求的剧增,人类跨越江河湖海等水域阻隔的现实需求逐步增多,目前,解决水域交通阻隔问题的主要手段有轮渡、桥梁、水下隧道等三种[1~4]。人类跨越水域交通阻隔的方式已经由轮渡方式逐步向“遇水架桥”式陆面跨越为主导、“水下隧道”地下联通方式兴盛的大方向发展。我国在近期以及今后相当长的一段时期内都将处于水下隧道建设的高速发展期[5,6]。

然而,在修建水下隧道的同时,施工、运营阶段水下隧道结构开裂和破损现象时有发生,给水下隧道衬砌结构的长期安全服役带来巨大的挑战。如施工期间的瑞士 Sorrenberg 内燃气隧道,广州地铁 1 号线、2 号线部分区间,上海地铁 7 号线、9 号线,武汉长江隧道等均出现过结构开裂及渗水现象[7]。施工期劣损及运营期的不良养护,极易进一步引发钢筋锈蚀,混凝土腐蚀、剥落、掉块等不同程度的病害,降低结构的承载安全性,增加工程的维修和养护成本。如迪拜的 Shindagha 海底隧道在建成 10 年后进行维修,维修费用高达建造费用的 2 倍。类似工程案例还有:日本近 70% 的隧道发生衬砌裂损病害,伦敦北线地铁盾构隧道管片被硫酸侵蚀后有开裂现象,运营不足 20 年的香港地铁部分区间及上海打浦路越江隧道的钢筋及连接件锈蚀问题,台湾高雄港过港海底隧道在运营 20 年后出现结构裂损、渗漏水、钢板锈蚀等问题,日本青函海底隧道在运营 10 年后出现严重的渗漏和腐蚀现象,厦门海底隧道的钢筋及初期支护锈蚀等[8~10]。通常

而言,水下隧道存在的种种病害,均与水下隧道工程周边环境及复杂的服役环境密切相关,如图 1、图 2 所示。

我国目前正处于水下隧道建设的高峰期,在如此大量、快速的建设背景下,如何保障重大水下隧道结构在设计、施工、运营、维修养护等全寿命周期内乃至长寿命使用条件下安全服役,已成为广大科技工作者面临的严峻挑战和重大课题。

二、隧道衬砌结构安全面临的问题

在隧道修建及运营的过程中,由于设计和施工不良、侵蚀环境的影响、突发自然灾害与突发事件等原因,导致隧道衬砌结构出现不同类型、不同程度的劣损和病害。

(一) 复杂地质条件导致的结构安全问题

随着一大批长度更长、水压更大、地质条件更加复杂及建设条件更加恶劣的隧道工程相继进入

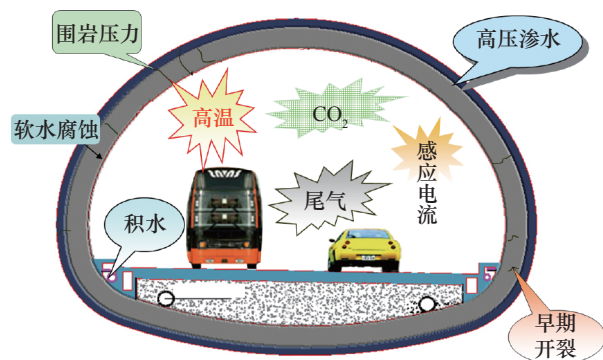


图 1 运营隧道复杂的服役环境



图 2 水下隧道工程周边环境示意图

规划和建设过程中，我国隧道建设将从既有城市软土环境向强透水地层、软弱互层、风化槽段、穿越岩层、孤石及硬岩凸起等复杂地质环境转变，地层岩性软硬不均，围岩物理力学参数离散性较大，导致荷载分布不均，隧道所受荷载的准确评价与量化包络变得更为困难，严重影响隧道结构的设计和施工安全。如：厦门西通道隧道（长 6.33 km，穿越多个风化槽段）、厦门南通道隧道（长 13 km，局部埋深 100~150 m，穿越多个强风化槽段）、舟山大陆连岛工程隧道（长 17 km，海水深度深、隧道长、存在国际级航道和光缆等敏感物）及汕头苏埃湾海底隧道（盾构法施工，长 5.5 km，局部地段穿越岩层，且设计地震烈度高达Ⅷ度），还有距离更长、建设条件更加恶劣的琼州海峡（最短海域宽度为 18.8 km，最大水深达 100 m）、渤海湾海峡（约为 108 km）和台湾海峡通道工程（最短直线距离为 120 km）。

水下隧道在穿越复杂地质条件和多变环境的同时，长期承受的水压力将进一步加大，在隧道衬砌结构服役期内将承受较高的水、土荷载作用，

材料非线性和几何非线性特征明显，加之河床的天然冲刷、海水的动力作用、交通运营振动等的累积作用，可导致隧道结构的受力状态发生改变，严重威胁隧道结构的服役安全。如在复杂多变的地质环境中，由于设计和施工不良、管片选型不当、盾构机姿态控制不佳、注浆压力过大、千斤顶推力不均匀、水土荷载考虑不周等原因，隧道主体结构在施工期与运营期会出现管片错台、管片开裂、管片掉块、渗漏水、不均匀沉降等病害，如图 3 所示。

（二）侵蚀环境作用导致的安全问题

据统计，我国现役处于亚健康状态的隧道约占 20%~30%，同样的，据统计，日本有 1600 多座公路隧道均存在材料劣化现象 [8]，侵蚀环境的持续致损作用严重威胁了隧道结构的长期服役安全。

在正常服役周期内，隧道衬砌结构常处于复杂的岩土环境中，将同时受到荷载环境（水土恒定荷载，疲劳荷载，瞬时荷载）和侵蚀环境（温湿



图 3 设计和施工不合理等原因导致的结构劣损

度, CO_2 、氯盐、酸、碱等)的长期共同作用,加之荷载尤其是高水压下周围氯离子侵蚀的加速促进作用,隧道衬砌结构材料和构件的力学性能将不断出现累积损伤及明显的性能劣化(见图4),如混凝土腐蚀和钢筋锈蚀导致结构开裂、破碎掉块、衬砌损毁等,影响衬砌结构承载能力并进而威胁结构的服役安全[12]。

(三) 突发自然灾害导致的结构安全问题

通常而言,因受到周围地层的约束作用,地下结构比地上结构的振动幅度小,且由于盾构隧道属于多体拼接的柔性结构,具有较强的抗震性能[13]。但在强震条件下,隧道工程震害依然较突出,如1923年的日本关东大地震、1995年的日本阪神大地震和1999年的台湾大地震等强震作用均导致地铁站和区间隧道出现严重震害[14]。在2008年的5·12汶川地震中,成都部分地铁盾构区间的震害特征明显,出现管片劣损、剥落、错台和渗漏水等形式的震害[15]。上述震害虽未对隧道主体结构产生致命破坏,但依然会对隧道结构的长期耐久性产生影响。

(四) 突发事故灾害导致的结构安全问题

隧道在运营的过程中,由于人为和管理等因素的影响,火灾、列车撞击、货车冲撞、爆炸等突发事件时有发生,加之缺少运营期的健康检测、监测和结构维护,使其“带病服役”,导致服役年限降低。高速公路隧道火灾和爆炸问题,高速铁路隧道内列车脱轨和撞击问题等,将不可避免地导致隧道衬砌结构的劣损,影响隧道结构整体的稳定,危及结构

安全。

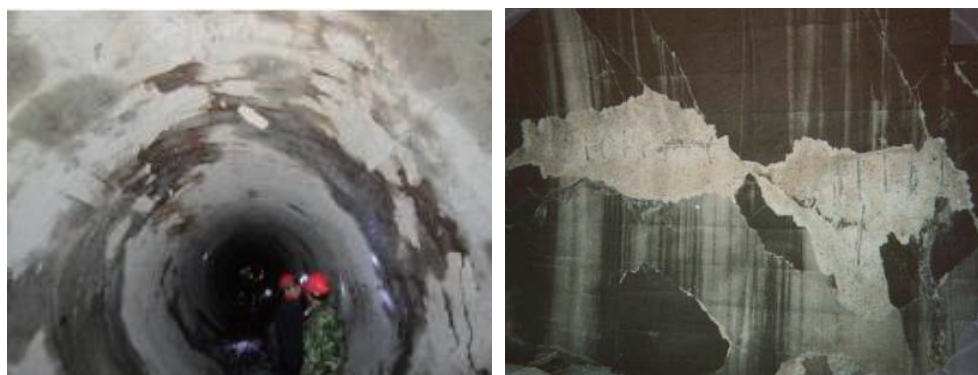
目前,我国水下隧道工程数量最多、建设规模最大、技术难度最复杂、发展速度最快,使得在结构设计、施工及维护过程中出现的问题增多,问题复杂度进一步加大,加之现代隧道工程正向超大断面、超埋深、超高水压与超长线性方向发展,如何保障我国隧道工程的系统可靠性及长期安全性是我们面临的一大技术挑战。

三、典型区域的水下隧道服役现状调查

以上海地区黄浦江越江隧道和地下交通隧道等水下隧道工程为基础(见图5),开展现场调研,重点分析既有水下隧道结构的服役现状及运营期的主要病害。

从隧道的运营调查结果发现,由于工程地质、水文地质、周围环境,加之设计、施工期处置不当,调研隧道在服役过程中均存在不同程度的病害,给隧道正常服役带来了巨大的安全隐患,如部分越江隧道出现严重的渗漏水、管片裂损明显和错台、侧施工缝漏水、进线电缆封堵孔漏水、管片接头破损或漏水、圆隧道与工作井接头漏水、圆隧道车道板裂缝、防撞墙裂缝、后浇板斜裂缝、管片开裂、沥青路面坑洞等。

其中,严重的渗漏水、隧道结构差异沉降增大、泥沙流失将导致结构荷载变异,促使结构开裂或原有裂缝增大,加速结构损伤和劣化;同时,腐蚀性地下水会加重对隧道结构及内部设施的侵蚀,增大隧道结构的耐久性损伤,使隧道处于带病害服役状态,降低服役隧道结构的可靠性,危



(a) 混凝土碳化与钢筋锈蚀

(b) 混凝土开裂剥落

图4 隧道衬砌结构的腐蚀劣化



图5 上海地区水下隧道工程分布图

注：已建成：外环隧道、翔殷路隧道、大连路隧道、外滩观光隧道、延安东路隧道、复兴东路隧道、上中路隧道、打浦路隧道、新建路隧道、人民路隧道、军工路隧道、龙耀路隧道、打浦路隧道（复线）、长江西路隧道、西藏南路隧道、上海长江隧道；规划中：殷行路隧道、嫩江路隧道、周家嘴路隧道、陆家浜路隧道、江浦路隧道、宛平路隧道、罗绣路隧道、虹梅南路隧道。

及行车安全。图6为隧道结构不均匀沉降及渗漏水病害情况。

四、水下隧道结构长寿命安全保障对策及思考

从隧道建设、结构性能退化、自然灾害、突发事故灾害等方面探寻隧道结构长寿命安全保障对策，确保隧道全寿命周期内乃至长寿命要求下结构的服役安全。

(一) 隧道建设方面的结构安全保障对策

目前，我国正处于隧道建设的高速发展阶段，地铁、高速铁路、电力管廊等水下隧道工程急剧增多，水下勘测、设计荷载、机械施工、新材料、安全保障等方面均面临重大挑战。

(1) 新型勘测手段的推广、应用与探索。随着现代信息技术和智能化的发展，地震反射、瞬变电磁法、测井、孔内电视等新型勘测手段采用从整体宏观控制与微观测试相结合的勘察、测试等方法，获取地质信息，修正地层参数，弥补传统地质钻孔

勘察的局限性。通过地质分析与工程物探相结合、地震方法与地磁方法相结合，共同解决隧道不良地质构造的超前预报问题。

(2) 改进并完善隧道结构的荷载理论。分析既有隧道衬砌结构的常用荷载计算方法发现，当前大多数隧道衬砌结构在设计时仅考虑静态恒定荷载，未对施工全工序过程中的荷载演变进行仔细考量，如在施工期的特定环境下，结构可能处于最危险的状态，其安全风险未得到全面、准确的控制。因此，应完善现有隧道的荷载理论，突出建设全过程中的荷载演变，考虑施工期荷载、运营期的特殊荷载、结构劣损后“减载效应”的影响。

(3) 开发隧道工程整体化、全寿命设计方法。综合考虑隧道建设环境条件、技术标准、使用功能与防灾救援、施工技术与安全风险等因素，进行考虑多类多因素的隧道整体化设计；运用“系统最优”“全寿命成本”等新理念和全寿命时变性分析方法进行隧道结构的全寿命设计，使隧道在全寿命周期中的总体结构性能（安全、适用、耐久、经济、美观、环保等）达到最优或优化。

(4) 机械化、信息化施工的推广。目前我国隧

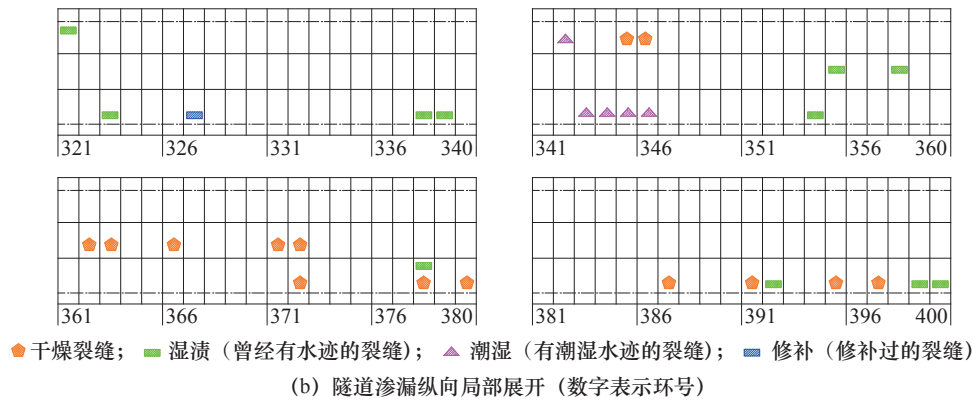
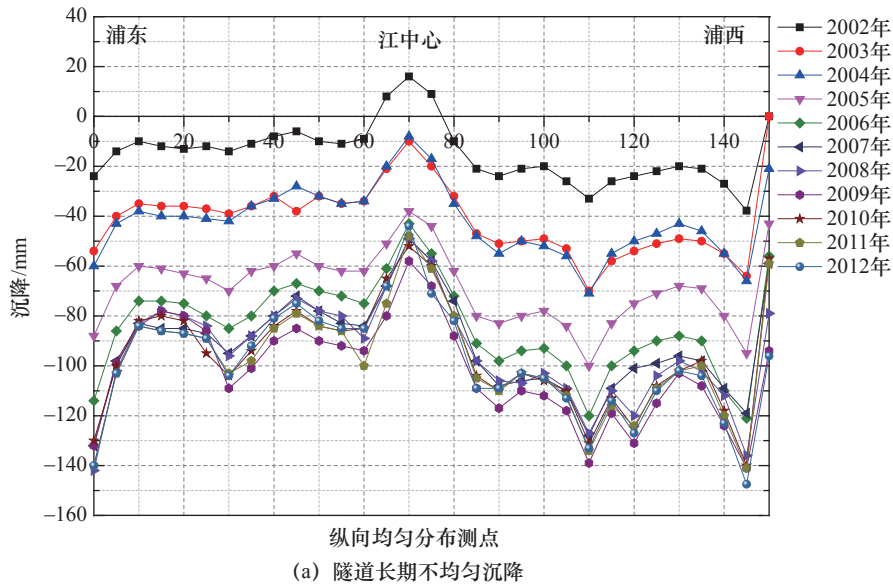


图6 隧道结构不均匀沉降及渗漏水病害情况

道施工方法已从传统的钻爆法、明挖法，向盾构法优先、钻爆与明挖相结合的方向发展，随着我国制造水平的不断提高，以及地铁盾构、铁路隧道等施工经验与技术的累积，我国已具备了使用盾构、掘进机修建高难度隧道工程的技术能力。随着人类不断地开发地下资源，城市深部地下空间开发、地下城市及地下综合管廊建设等不断进步，机械化、信息化施工技术将必然得到深入发展，应优先为地下空间的开发创造有利条件。

(5) 突破重大隧道结构的安全评价系统方法。研究隧道结构安全状态评价方法，形成风险评价模型并进行风险等级划分，建立区域针对性、地质条件针对性、结构针对性的隧道结构安全评价体系。

(6) 开发隧道结构安全性与健康状态智能评价与预警软件系统。研究开发隧道结构安全性和健康

状态智能评价与预警软件系统，可以实现对隧道结构安全性与健康状态的智能评价，并能对结构安全性进行预测预警。

(二) 结构性能退化方面的结构安全保障对策

为转变工程界存在的“重建设、轻维护”现象，忽视隧道结构劣化、老化对隧道结构长期安全性与耐久性的不利影响，亟需转换思维，从结构全寿命安全性及经济性成本分析的角度，变被动维修为主动控制和主动预防，全面系统地从可靠度和耐久性设计、质量控制技术、综合性防护体系、全寿命防腐蚀等方面出发，防控重大隧道结构劣化、老化等安全风险。

(1) 研究重大隧道建成初期及运营期的结构性能。在隧道结构建造和运营的全过程中，其结构性能会随着内外环境的不同，发生不同类型的响应。

建成初期,荷载及结构量化较为准确,对其结构性能判定较为准确,但由于运营期荷载的不确定性、随机性以及外部作用的持续性,服役隧道结构性能的准确评价面临极大的挑战。为此,应采用理论分析、室内试验、数值模拟等手段,结合有代表性的点、线乃至区域隧道现场测试结果,建立重大隧道结构全寿命性能评价方法和理论体系。

(2) 加快修订定量设计、可靠度量的耐久性设计规范。以可靠性理论为基础,综合考虑隧道结构的岩土环境、腐蚀环境以及服务运营环境的特点,构建全面、考虑多因素耦合影响的隧道结构耐久性定量设计理论,从国家及行业监管层面制定隧道结构耐久性设计规范,从预可行性研究、设计阶段起,全面持续重视隧道结构的长期安全性及耐久性。

(3) 建立隧道结构全寿命周期的质量控制标准与防护体系。加强施工期隧道结构的施工质量控制标准和监控,对混凝土水灰比、混凝土保护层厚度、混凝土氯离子扩散系数等关键结构的耐久性的重要参数进行重点控制,配制高耐久性混凝土;采用全寿命成本分析理论,开展隧道结构防腐蚀方案设计,增加结构安全储备。

(4) 加强新材料、新型防腐蚀技术、信息化耐久性监测技术的研究。加强新型耐久性材料的研发与应用推广;开展混凝土防腐、钢筋主动防腐等新技术、新工艺研究;加强全寿命耐久性监测技术和监控体系研发;从产学研相结合的角度推广新成果快速应用。

(三) 自然灾害作用下隧道结构的安全保障对策

隧道作为地下结构具有较好的抗震性能,一般情况下其震害并不如地面结构严重,但其作为交通运输的生命线工程,特别是隧道破坏后的修复与重建工作,从难度、经济性、工期等各个方面相比地面建筑的震害处理都处于劣势,因此,隧道工程尤其是重大隧道的地震安全保障显得尤为重要。

(1) 建立地震作用下隧道结构安全保障体系的核心目标。确保设防烈度地震作用下隧道结构不发生或者发生轻度破坏,稍作修复便可继续使用;关键线路隧道在震后能够通过修复手段恢复原设计使用功能;建立健全隧道震后震害辨识、评估和应急

机制,使地震时相关隧道的地震响应及震害特征能迅速被反馈和评估,并投入到抢险救灾和灾后重建工作中去;形成完整的震后隧道修复和重建的评定标准、技术措施和方案比选准则体系,为震后隧道结构的修复或重建以及修复或重建的方案和技术提供参考。

(2) 隧道的抗震规划、设计和施工。对于在规划建设中的隧道结构,从规划、设计到施工阶段均应按规范要求对隧道结构的抗减震设计,并充分考虑震后隧道的震害反馈和应急预案。在规划设计阶段,充分考虑我国的地质、地形条件,尽量避免隧道处于高烈度地震区、活动断裂带、不稳定边坡等位置,从场地、地震烈度等多个方面进行方案比选,对于高烈度地震区、重要隧道工程、穿越特殊地质条件的隧道应进行专门的抗震设计研究。

(3) 抗震设防技术。在抗震设防技术上,大力研发适用于隧道结构抗减震的措施、材料和技术,将地下结构抗减震技术从理论阶段推广到广泛应用阶段,并逐渐形成针对浅埋、偏压、断层等地震易损地质段的隧道抗减震技术体系。

(四) 突发事件灾害作用下隧道结构的安全保障对策

隧道在运营过程中面临爆炸、火灾、车辆撞击等灾害事故,影响结构安全。

(1) 加快推进重大隧道结构的安全保障体系的建立及完善。以风险理论为基础,综合考虑隧道运营环境、地区经济、国家战略等因素,统筹公共安全、交通运输、建筑等行业,广泛吸纳设计、建设、运营、科研、装备、材料等机构和单位的意见,加快完善隧道结构的安全保障标准和规范体系。

(2) 对危险化学品车辆等重大危险源的防范。隧道在运营的过程中,液化石油气车辆、重型货车等重大危险源是可能造成隧道结构破坏的重要风险源之一,应加强采用新技术、法律、法规等多方面措施,禁止危险化学品运输车辆进入重大隧道结构。

(3) 加强隧道结构损伤致害机理、防护技术、设备设施以及新材料的科学研究。开展重特大火灾、爆炸、列车撞击等作用下重大隧道结构损伤机理及力学行为研究;研究既有劣化、老化结构在突发灾

害(爆炸、火灾等)下的结构安全保障技术;加强对重大灾害的预警、探测、防护技术及设备的研发工作;加强推进新型防火涂料、防火板等隧道结构安全防护材料的研发。

五、结语

目前,我国是水下隧道工程建设规模最大、技术难度最复杂、发展速度最快的国家,工程建设及运营维护过程中出现的问题不断增多,问题复杂程度也正在逐步扩大,随着现代隧道工程向超大断面、超大埋深、超高水压及超长距离等方向发展,如何保障我国大量修建的水下隧道工程的系统可靠性及长期安全性是广大科技工作者面临的严峻挑战。

全寿命周期内,水下隧道处于复杂水土荷载环境、内部运营环境以及内外多变侵蚀环境的长期交互耦合作用下,隧道结构性能持续渐进性地发生损伤、劣化和性能衰退。鉴于此,针对短期内大量修建的水下隧道工程,当前科研任务的重点为开展全寿命周期内隧道结构性能保持计划,准确、合理、可控地确保全寿命周期内水下隧道的结构安全,并在全寿命周期安全保障的基础上,科学规划、分步实施,开展水下隧道结构的“延寿工程”,拓展已建及待建重大水下隧道结构的使用寿命,实施水下隧道结构长寿命安全保障战略。

参考文献

- [1] 项海帆. 21 世纪世界桥梁工程的展望 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 1-6.
Xiang H F. Prospects for world's bridge projects in 21st century [J]. Journal of Civil Engineering, 2000, 33 (3): 1-6.
- [2] 钱七虎. 由桥隧并举跨江越海所引发的思考 [J]. 岩土工程界, 2007, 6(7): 3-5.
Qian Q H. Reflections on crossing rivers and seas by bridge and tunnel [J]. Geotechnical Engineering, 2007, 6 (7): 3-5.
- [3] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1513-1521.
Sun J. Discussion on some key technical issues for design and construction of subsea tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (8): 1513-1521.
- [4] 王梦恕. 21 世纪我国隧道及地下空间发展的探讨 [J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 7-9.
Wang M S. Development of tunnel and underground space in 21st century in China [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 7-9.
- [5] He C, Wang B. Research progress and development trends of highway tunnels in China [J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(4): 209-223.
- [6] 何川, 封坤. 大型水下盾构隧道结构研究现状与展望 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 1-11.
He C, Feng K. Review and prospect of structure research of underwater shield tunnel with large cross-section [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46 (1): 1-11.
- [7] 肖明清. 大型水下盾构隧道结构设计关键问题研究(博士学位论文) [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
Xiao M Q. Research on key issues of segmental lining structure design for underwater shield tunnel with large cross-section (Doctoral dissertation) [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [8] 何川, 余健. 高速公路隧道维修与加固 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
He C, She J. Maintenance and reinforcement of highway tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [9] Burgess N, Fagents J, Paterson J. Northern line tunnel reconstruction at old street [C]. Proceedings of the ICE-Transport, 2002, 153(1): 1-11.
- [10] 何川, 封坤, 方勇. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望 [J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 97-109.
He C, Feng K, Fang Y. Review and prospects on constructing technologies of metro tunnels using shield tunnelling method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(1): 97-109.
- [11] 关宝树. 隧道维修管理要点集 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Guan B S. Key points of tunnel maintenance management [M] Beijing: China Communications Press, 2004.
- [12] 王建强. 地铁隧道衬砌结构钢筋锈蚀及耐久性研究(硕士学位论文) [D]. 西安: 长安大学, 2009.
Wang J Q. Study on lining structure steel corrosion and durability of subway tunnels (Master's thesis) [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [13] 李林, 何川, 耿萍, 等. 浅埋偏压洞口段隧道地震响应振动台模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2540-2548.
Li L, He C, Geng P, et al. Study of shaking table model test for seismic response of portal section of shallow unsymmetrical loading tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2540-2548.
- [14] 高峰, 孙常新, 谭绪凯, 等. 不同埋深隧道的地震响应振动台试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2517-2531.
Gao F, Sun C X, Tan X K, et al. Shaking table tests for seismic response of tunnels with different depths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2517-2531.
- [15] 钱七虎, 何川, 晏启祥. 隧道工程动力响应特性与汶川地震隧道震害分析及启示 [M]// 宋胜武. 汶川大地震工程震害调查分析与研究. 北京: 科学出版社, 2009: 608-618.
Qian Q H, He C, Yan Q X. Dynamic response characteristics of tunnel project and damage analysis and enlightenment of tunnels in Wenchuan Earthquake [M]// Song S W. Analysis and investigation on seismic damages of projects subjected to Wenchuan Earthquake. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2009: 608-618.