引用格式　许庆,徐晓达,曾滨,等. 预应力混凝土结构性能评价技术研究进展及展望[J]. 工业建筑,2024,54(10):1-8. XU Q,XU X D,ZENG B,et al. Research Progress and Prospect of Performance Evaluation Techniques for Prestressed Concrete Structures[J]. Industrial Construction,2024,54(10):1-8 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gyjzG24091907

预应力混凝土结构性能评价技术研究进展及展望*

许　庆[1,2]　徐晓达[1]　曾　滨[1]　李嘉伟[1,3]

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京　100088; 2. 清华大学土木工程系, 北京　100084;
3. 北京工业大学城市建设学部, 北京　100124)

摘　要　预应力混凝土结构自引入我国以来,经历了几十年消化吸收和再创新过程,已成为实现结构性能再提升和满足多样化设计需求的重要结构形式之一,应用广泛,且目前已建成了大量的预应力混凝土建、构筑物。从发展历程、性能评价需求、预应力检测监测技术、服役性能评价方法等方面阐述了预应力混凝土结构服役性能评价领域的关键技术和发展现状;从理论、技术、应用三方面展望了预应力混凝土结构未来发展趋势;重点提出了不确定性评价理论、材料-结构一体化评价技术和智能化服役性能评价方法等未来发展方向;旨在为预应力混凝土结构领域研究和实践提供参考。

关键词　预应力混凝土结构;检测技术;监测技术;性能评价方法;智能化评价

Research Progress and Prospect of Performance Evaluation Techniques for Prestressed Concrete Structures

XU Qing[1,2]　XU Xiaoda[1]　ZENG Bin[1]　LI Jiawei[1,3]

(1. *Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing* 100088, *China*;
2. *Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*;
3. *Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*)

Abstract: Prestressed concrete structure has undergone several decades of digestion and absorption, and re-innovation since its introduction to China, which has become one of important structural forms to achieve further enhancement of structural performances and meet diverse design demands. Prestressed concrete structure has been widely applied and a large number of prestressed concrete buildings and structures have been constructed up to now. The key techniques and development status in the field of the performance evaluation on prestressed concrete structures from the aspects of development history, performance evaluation needs, prestress detection and monitoring techniques, and performance evaluation methods were expounded. The future development trends of prestressed concrete structure from the three aspects of theory, techniques and application were envisaged. The future development directions involving uncertainty evaluation theory, material-structure-integrated evaluation techniques, and intelligent service performance evaluation methods were focused. It was expected to provide references to research and practice in the field of prestressed concrete structure.

Keywords: prestressed concrete structure; detection technique; monitoring technique; performance evaluation method; intelligent evaluation

* 十四五重点研发计划(2022YFC3801800);国家自然科学基金项目(52378320,52308334)。

第一作者:许庆,硕士,正高级工程师,主要从事预应力结构性能的研究。

电子信箱:xuqing@cribc.com

收稿日期:2024-09-19

© 2024 工业建筑

0　引　言

预应力混凝土结构具有低碳节材、空间跨越能力强的特点,广泛应用于工业与民用建筑、公铁桥梁、核电能源等工程领域,已成为实现结构性能再提升和满足多样化设计需求的重要结构形式之一。

预应力混凝土结构在服役过程中,受复杂环境及超载、疲劳等多样服役条件的影响,预应力作用逐渐衰减,导致结构性能退化,结构的正常使用功能及承载能力下降,甚至导致严重的安全事故,1996 年 9 月 26 日帕劳大桥因预应力损失过大,在正常服役中发生坍塌,造成了严重的交通中断和经济损失,见图 1(a)。2021 年 11 月 12 日,黄石大桥因预应力不足,未能有效抵抗持续增长的交通荷载,导致结构出现下挠过大的现象,经过专业评估后决定予以拆除,见图 1(b)。



(a) 帕劳大桥倒塌　　(b) 黄石大桥拆除

图 1　近年预应力混凝土结构事故

Fig. 1　Accidents involving prestressed concrete structures in recent years

预应力混凝土结构预应力衰减的问题不仅威胁到结构的安全和功能,也对结构的可靠性提出了严峻的考验。因此,为确保工程结构的长期稳定运行,预应力混凝土结构的检测、监测、评价和性能提升技术已逐渐成为现阶段土木工程领域关注的焦点。

通过回顾预应力混凝土结构的发展历程并结合服役现状,对新时期的结构性能评价需求进行总结;随后,对预应力检测监测、性能评价等技术现状进行阐述;最后,从不确定性理论、智能化评价技术、材料-结构一体化评价方法三个方面展望未来发展方向,为预应力混凝土技术的持续发展提供新的视角和思路。

1　预应力混凝土结构发展历程

1.1　发展历程

预应力混凝土结构诞生于 19 世纪 80 年代,美国工程师 Jackson 首次提出了提出了预应力的概念。[1] 二战后钢材短缺,为尽快恢复和重建基础设施,各国均大量采用了预应力技术,预应力混凝土结构在世界的范围内得到了广泛的应用。

我国预应力混凝土结构的开发、应用始于 20 世纪 50 年代,各研究院所和大专院校在传统混凝土结构的基础上,借鉴国外已有的理论及技术研究成果,对预应力混凝土结构展开了一系列的探索和研究。纵观历史,预应力混凝土结构在我国的发展主要分为 4 个阶段:

1950—1956 年,是我国学习和试验预应力混凝土技术的阶段。在此期间,研究工作者对预应力混凝土结构材料及构件性能开展初步研究,成功试制我国第一根预应力混凝土轨枕[2]。

1956 年—1977 年,我国进入了预应力混凝土结构的逐步推广阶段。在材料方面,开发了 1 600 MPa 高强钢丝及 1 000 号高强混凝土;在锚固方面,研发了预应力圆锥形夹具、楔形夹具等锚固体系;在构件方面,设计和试制了如预应力吊车梁、双曲板、屋面板等系列预应力混凝土构件;在标准方面,颁布了我国建筑领域的首部预应力技术标准——《预应力钢筋混凝土施工及验收规范》(建规 3—60)。

1978—1997 年,改革开放后,我国预应力混凝土技术得到了新生,全面进入高速发展的时期。基于 1 860 MPa 钢绞线等高强、低松弛钢材[3]、高强度混凝土[4]、OVM 等新型预应力锚具[5]的研发应用,大空间预应力混凝土结构、多高层预应力混凝土建筑以及特种预应力混凝土工程大量建成,较为著名的建筑有北京饭店贵宾楼、北京首都国际机场停车楼等。

1998 年至今,预应力混凝土技术进入稳定发展的新时期。近年来,我国预应力钢绞线年产量稳定在 550 万 t 左右(图 2),标志着预应力混凝土技术在我国的发展已逐渐趋于成熟。此外,预应力混凝土领域的标准也不断推陈出新,初具规模,部分标准见表 1。

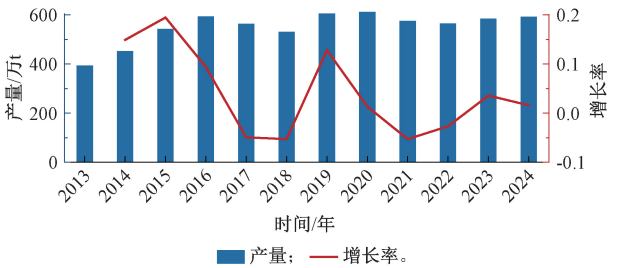


图 2　预应力钢绞线年产量统计

Fig. 2　Statistics of annual output of prestressed steel strands

预应力混凝土结构系列标准的制定和实施,为预应力混凝土结构的设计、施工和维护提供了全面

的技术支撑,保障了结构的安全性、可靠性和经济性,促进了预应力混凝土技术在各个工程领域的广泛应用。

表 1　我国预应力混凝土领域标准

Table 1　Standards in the field of prestressed concrete in China

类型	标准名称
建筑材料	GB/T 5224—2014《预应力混凝土用钢绞线》[6]
	GB/T 5223.3—2017《预应力混凝土用钢棒》[7]
	GB/T 13476—2023《先张法预应力混凝土管桩》[8]
结构设计	GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》[9]
	JGJ 19—2010《冷拔低碳钢丝应用技术规程》[10]
	JGJ 92—2016《无黏结预应力混凝土结构技术规程》[11]
运营维护	CECS 220:2007《混凝土结构耐久性评定标准》[12]
	GB/T 50344—2019《建筑结构检测技术标准》[13]
	GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》[14]
	T/CECS 1363—2023《预应力结构诊治技术规程》[15]

1.2　新时期性能评价需求

“十四五”起,我国城镇化从高速发展转入高质量发展阶段。[16]目前,我国预应力建筑存量已超 80 亿 m^2,增量超 5 亿 m^2/a;截止 2023 年末,我国公路桥梁已超百万座,铁路总里程约 15 万 km,其中 20% 的铁路线采用桥梁支承,混凝土桥梁中约 95% 以上采用了预应力技术。服役性能的准确评价是确保预应力混凝土结构服役安全、长效稳定的重要基础。在实际工程中,预应力混凝土结构的服役性能评价通常围绕性能劣化、功能改变和延寿利用三个核心展开。

1.2.1　性能劣化

据不完全统计,我国预应力建筑中约 30% 已进入服役中后期;公路路网中约 40% 在役桥梁服役已超 20 a。随着时间推移,服役运维阶段的环境侵蚀[17]、材料老化[18]等多种因素影响下,结构服役性能不断衰减,为保证结构运维期间安全性,须定期进行服役性能评价,以保证结构服役期间的可靠性和稳定性。

1.2.2　功能改变

城市功能的整体演变往往导致工业与民用建筑使用功能的改变。[19]为确保建筑物功能改变过程中的安全,住建部规定建筑物功能改变前,须进行全面的安全评估,以保证建筑物功能改变后能够满足新的使用需求,消除安全隐患。

1.2.3　延寿利用

在我国“双碳”战略的推动下,既有结构的延寿利用[20]成为一种实现可持续发展、节约资源和减少环境影响的有效策略。为保障超期结构再服役的安全性,须通过综合性评价手段,准确评价结构的当前状态和预期寿命,实现成本效益最大化和资源优化利用。

2　预应力混凝土结构监检测技术

实时的有效预应力是影响既有预应力混凝土结构服役性能的关键因素之一。准确评价预应力结构服役性能的重要前提是对结构内有效预应力的精准把控。混凝土结构中预应力筋隐蔽性强、测量难度大。各国学者总结有效预应力对构件性能的影响规律,研发多种有效预应力原位检测技术,通过直接测量或间接推算确定结构实时的有效预应力。近年来,部分检测或监测技术已较为成熟,并逐步应用于实际工程中。

2.1　无损检测方法

无损检测是在不损伤结构的前提下,通过分析热、电、振动等物理响应信号,探明结构内部缺陷并评估其状态的方法。无损检测技术主要包括声发射检测、超声波检测、临界应力法以及振动检测法等。

2.1.1　声发射技术

声发射技术[21]是通过声发射传感器采集材料受到外部力作用或内部发生微观结构变化(如裂纹开展、塑性形变等)时产生的应力波,分析材料的内部状态。但在预应力混凝土中,由于混凝土厚度大,材料离散性高,信号解析难度大,检测精度难以保证。

2.1.2　超声波技术

超声波技术[22]通过分析超声波在钢绞线中的传播特性,来检测结构内的预应力水平,利用超声波频率变化来识别钢绞线的应力变化。但该方法在预应力混凝土中的应用受限于材料的非均质性和复杂的耦合参数,仍需进一步研究,以提高检测的准确性和可靠性。

2.1.3　临界应力法

临界应力法[23]通过对传统拉脱法的改进,借助开发的张拉端锚具的超短夹持及张拉设备,通过对预应力筋的张拉,得到钢绞线开锚前后的应力-应变关系,提出了精确判定预应力值的双折线准则,实现了对既有结构预应力筋有效预应力的原位精确检测。

2.1.4　振动法

振动法[24]依托结构动力特性变化来检测预应力水平,通过对预应力混凝土结构中的外露钢绞线

施加动态激励荷载并采集其振动响应,识别结构的自然频率和振型,根据多个决定结构响应模式的特征参数构成的关联模型,计算结构内部的预应力状态。

2.2　有损检测方法

有损检测通过对结构进行微破损使结构发生性状变化,通过变化过程中各项物理参数的改变来反推结构初始的工作状态,从而评估构件的服役性能。有效预应力有损检测技术主要有应力传递法、开裂力矩法、横张增量法等。

2.2.1　应力传递法

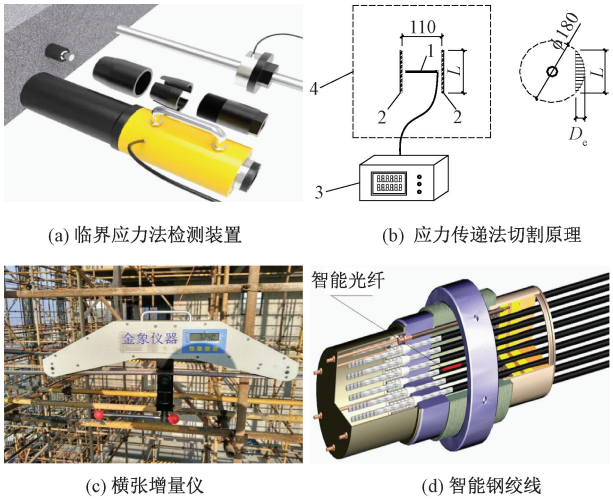
应力传递法[25]通过切割受压区混凝土,解除混凝土的局部约束,释放混凝土压应力,依托混凝土本构关系,计算测点处初始应力。

2.2.2　开裂力矩法

开裂力矩法[26]首先对结构加载至结构出现表观裂缝,随后卸载,在裂缝处加装位移计,再次加载至裂缝重新扩展。在此过程中,裂纹宽度与施加荷载之间存在确定的映射关系,可据此计算结构内残余预应力。

2.2.3　横张增量法

横张增量法[27]基于钢束的横向位移、预拉力、竖向加载力与测试钢束长度四者之间的几何和物理关系,进行有效预应力检测。通过建立相应的函数关系模型,输入竖向加载力的数值,即可计算结构的有效预应力值。



(a) 临界应力法检测装置　(b) 应力传递法切割原理

(c) 横张增量仪　(d) 智能钢绞线

1—应变片;2—开槽;3—应变仪;4—工作区域。

图 3　预应力检测装备　mm

Fig. 3　Prestress testing equipments

几种检测方法的成熟度如表 2 所示。

2.3　监测技术

预应力监测技术对于长期服役条件下的预应力演化规律探究和结构后续寿命预测具有重大意义,现有的监测技术主要包括阻抗方法和弹磁方法等。

2.3.1　阻抗方法

阻抗方法[28]基于压电效应,在外力作用下,压电材料如铅锌钛酸盐(PZT)会产生电荷,其电阻抗也随之变化。通过在结构表面黏贴 PZT 传感器并施以交流电场,可探测由结构响应引起的传感器形变及其电阻抗变化,进而推断结构的应力状态。尽管此技术对裂纹、分层等局部损伤极为敏感,但其准确性受温度波动的影响较大,故需精确的温度补偿机制以确保数据的可靠性,提升其在工程实践中的应用效果。

表 2　各类检测方法成熟度统计

Table 2　Statistics on maturity of various detection methods

方法		检测技术	分析理论	损坏程度	精确度
有损测试	应力传递法	■	■	■	■
	开裂力矩法	■	■	■	
	横张增量法	■	■	■	
无损测试	临界应力法	■	■		■
	超声波检测	■	■		■
	声发射技术	■	■		■
	振动法	■	■		■
监测技术	阻抗方法	■	■		■
	弹磁方法	■	■		■
	智能钢绞线	■	■		■

2.3.2　弹磁方法

弹磁方法[29]依托铁磁材料在机械应力作用下磁特性变化的原理,对结构应力状态进行非接触式监测,通过测定铁磁材料如钢绞线,在外加应力影响下磁化曲线及磁导率的变化,间接计算其内部应力。

2.3.3　智能钢绞线

智能钢绞线[30]集成了光纤光栅传感技术,利用光波反射波长的变化来检测应变,具有高分辨率和

高稳定性的特点。智能钢绞线将钢绞线中芯丝替换为光纤光栅传感中芯丝,根据中芯丝的应变变化,推断预应力钢绞线内部应力,为预应力的实时监测提供了一种高效、准确的技术手段。

3　既有预应力混凝土结构性能评价

3.1　传统评价方法

结构服役性能评价及使用寿命预测是预应力混凝土结构服役安全的重要保证。传统预应力混凝土结构评价方法主要侧重于通过检测和分析材料性能退化[31]、损伤积累[32]、以及构件变形[33]等病害特征,从而评估结构当前状态,识别潜在风险,预测结构的预期服役寿命。例如工程中常见的材料耐久性评价[34]、疲劳损伤评价[35]、裂缝或构件变形等表观病害评价[36]等。然而,预应力结构由于初始预加应力的存在,其结构的服役性态有其特殊性。上述传统预应力混凝土结构评价方法主要沿用混凝土结构“随机构件检测-结构设计复核”的思想,未考虑实际有效预应力分布的特殊性,对于预应力时变损失分析依据理论公式从设计态进行推算,可能造成理论值与实际值间偏差较大。近年来随着既有结构预应力检测技术的持续进步,已可准确获取部分类型混凝土结构的有效预应力值。基于预应力实测数据,考虑结构预应力体系分布特征的结构性能评价方法逐渐发展。

3.2　基于预应力体系分布特征的结构性能评价方法

3.2.1　时变效应

混凝土收缩徐变、预应力筋松弛所引起有效应力减小被称预应力长期损失。传统研究主要以时间因素为主要变量,在静力的条件下,考虑应力、温度、材料特性等因素的影响,通过理论分析、试验和数值模拟,建立系列混凝土徐变和预应力筋松弛模型[37],并在此基础上提出了综合估算法[38]、分项叠加法[39]和时步分析法[40]等预应力长期损失计算方法。上述研究仅从筋或索的材料特性入手,未能从实际服役状态的结构层面出发,考虑服役过程中风、雪、车辆、行人及温度变化等荷载与预应力长期损失的耦合影响,使得预应力长期损失计算有所偏差。

近年来,科研工作者考虑预应力结构的服役特征,围绕疲劳荷载作用下预应力长期损失加速和放大现象进行研究。根据疲劳-松弛应力曲线的发展特征,建立动态荷载影响下的非线性疲劳-松弛应力理论模型[41];探明服役荷载作用下混凝土徐变发展规律,建立了疲劳荷载下混凝土徐变应变本构模型[42];在此基础上,考虑混凝土徐变、收缩和预应力筋松弛的相互影响,提出考虑服役荷载作用的预应力长期损失计算方法[37]。该计算方法能够有效分析复杂服役条件下结构预应力的时变规律,提高预应力结构长期性能评价预测精度。

3.2.2　空间离散

预应力筋在张拉和服役过程中,受材料、施工、设计等参数随机性的影响,其真实有效预应力存在不确定性[43]。此外,受建筑布置、功能需求、荷载条件的影响,不同位置预应力筋的预应力损失程度并不相同,其有效预应力分布存在不均匀性。受不确定性和不均匀性影响,结构预应力体系的有效预应力分布呈现一定的空间离散特征,其概率分布可采用高斯混合模型近似表征[44]。高斯混合模型可定量分析结构中各预应力筋的不确定性,准确量化预应力体系的空间离散特征,为结构服役性能评价提供科学依据。

3.2.3　预应力体系实测分析及结构性能评价

混凝土结构的预应力体系往往由工况各异、数量众多的预应力筋组成,且受限于检测成本和工作平面,难以实现结构内预应力筋全样本检测,须采取实测抽样的方式进行估计。[45]然而,全结构预应力体系作为抽样总体,其概率分布服从高斯混合模型,使得传统评价方法无法根据零散实测抽样数据准确把握结构内整体有效预应力分布性态特征。为解决上述问题,科研工作者建立了结构预应力体系高斯混合模型和正态显著性判定准则,将复杂结构有效预应力混合概率模型近似简化为正态分布及 N 子分布($N\leqslant 5$)高斯混合模型,并在此基础上,引入序贯估计思想[46],建立了适用于工程实际所需的抽样停止准则,提出了基于实测数据的单筋、构件、结构多层次有效预应力概率参数估计及评价特征值计算方法[47]。基于有效预应力评价特征值对预应力混凝土结构服役性能进行评价,可有效提高评价的科学性、准确性。

4　展　望

4.1　理论上:基于不确定性度量的体系可靠度演化研究

现有的不确定量化研究往往在总结试验、实测等大量观测数据基础上,建立影响参数的概率模型,

属于强统计研究。然而,影响预应力混凝土结构服役性能的不确定性因素众多,且形式多样,一些不确定性因素由于观测数据稀疏或对其认知不足,导致建立的概率模型存在一定偏差,无法准确表征不确定参数的变化特征,进而影响后续建模和计算的可靠性[48]。因此,在结构服役性能评价中,须在现有概率理论的基础上,引入区间、证据等非概率建模方法,开展不确定性度量研究,建立基于实测数据的随机参数不确定性表征模型,探明影响参数和结构服役性能之间不确定性传播规律[49],构建基于不确定性度量的预应力体系可靠性演化分析理论,以实现预应力混凝土结构服役性能的精准评价和科学预测。

4.2　技术上:材料-结构一体化评价

预应力混凝土结构在高预压应力、疲劳作用、环境因素的耦合影响下,材料应力状态会随时间发生改变,局部材料损伤持续积累,进而影响徐变、松弛等材料特性的发展,致使结构整体受力状态的时随变化;而材料非线性与结构非线性相互影响、实时耦合,很难通过传统的模型来描述。因此,须将材料的损伤劣化与结构性能退化相结合,建立材料-结构物理力学性能双向定量映射关系[50],探明两者之间的时变交互影响规律,分析复杂服役条件下结构的长期性能发展规律,最终建立预应力混凝土结构材料-结构一体化评价方法,实现预应力混凝土结构性能微观到宏观的全面评估。

4.3　手段上:智能化评价

随着人工智能技术的不断发展,服役性能智能化评价[51]已成为预应力混凝土结构向高效率、高质量发展的必然趋势。智能化的评价可分为“诊”和“断”两部分。在“诊”的方面,研发既有预应力混凝土结构的多类型传感器时空同步测试系统[52],从多个维度和角度实时监测和收集结构的服役状态数据,并在此基础上建立多元数据的智能融合方法[53],实现结构服役性能的多元感知。在“断”的方面,集成工程实测数据、理论数据、试验数据等数据信息,通过数据清洗、分类存储、特征参数提取等构建结构服役性能信息数据库[54],借助智能化算法挖掘环境、材料、损伤与结构性能的潜在关联,实现基于实测数据预应力混凝土结构服役性能智能评价和健康评估。

5　结束语

我国预应力混凝土结构经历了几十年引进、消化吸收、再创新的过程,成为实现大跨度和复杂造型建筑的主要结构形式之一,应用广泛且存量巨大。现今,随着“城市更新”等系列国家战略的持续推进,存量预应力混凝土结构的性能评价和提升已逐步成为工程与研究界关注重点。在实际工程中,尽管预应力混凝土结构的性能评价已经取得了一定的进展,但仍在一定程度上存在“测不清”“算不准”的问题,亟须通过先进的检测监测技术、性能评价方法进行完善。

未来,预应力混凝土结构性能评价领域将从理论分析、技术研发、智能化应用等方面进一步发展。在理论方面,建立基于不确定性度量的预应力体系可靠性演化分析理论,科学量化复杂服役条件下结构服役性能,降低评价结果的不确定性;在技术方面,构建预应力混凝土结构材料-结构一体化评价技术,实现预应力混凝土结构性能微观到宏观的全面评价,为工程运维提供更为精确的数据支持。在应用方面,通过智能化算法深挖各影响因素之间潜在关联,实现结构服役全生命周期服役性能的智能评价。

随着性能评价技术体系的持续创新和完善,预应力混凝土结构的安全性和稳定性得到进一步的提升,预计将在未来土木工程领域发挥更为重要的作用,应用前景广阔。

参　考　文　献

[1]　李国平. 预应力混凝土结构发展史[J]. 建筑, 2008(21):1.

[2]　尤瑞林,范佳,宁迎智. 我国铁路有砟轨道预应力混凝土轨枕的研究与发展综述[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(7):1-6.

[3]　马林. 国产 1860 级低松弛预应力钢绞线疲劳性能研究[J]. 铁道标准设计,2000(5):21-23.

[4]　谢承德. 高强混凝土性能研究[J]. 混凝土及加筋混凝土,1989(3):3-11,43.

[5]　胡世德. OVM 预应力锚固体系锚下应力分析[J]. 公路,1992(1):25-29.

[6]　国家市场监督管理局. 预应力混凝土用钢绞线:GB/T 5224—2023[S]. 北京:中国标准出版社,2023.

[7]　中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 预应力混凝土用钢棒:GB/T 5223.3—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[8]　国家市场监督管理局. 先张法预应力混凝土管桩:GB/T 13476—2023[S]. 北京:中国标准出版社,2023.

[9]　中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[10]　中华人民共和国住房和城乡建设部. 冷拔低碳钢丝应用技术规程:JGJ 19—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[11]　中华人民共和国住房和城乡建设部. 无黏结预应力混凝土结

构技术规程:JGJ 92—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[12] 中国工程建设标准化协会. 混凝土结构耐久性评定标准:CECS 220:2007[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构检测技术标准:GB 50344—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[15] 中国工程建设标准化协会. 预应力结构诊治技术规程:T/CECS 1363—2023[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2023.

[16] 罗小龙,陆建城."十四五"时期发展新趋势与国土空间规划应对[J]. 城市规划,2019,43(10):9-12,28.

[17] PILLAI R G, HUESTE M D, GARDONI P, et al. Time-variant service reliability of post-tensioned, segmental, concrete bridges exposed to corrosive environments[J]. Engineering Structures, 2010, 32(9): 2596-2605.

[18] HUANG X, KWON O S, BENTZ E. Evaluation of CANDU NPP containment structure subjected to aging and internal pressure increase [J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 314:82-92.

[19] 武乾,张特刚. 基于再生改造的旧工业厂房结构安全分析[J]. 建筑结构,2016,46(5):58-62.

[20] NEZAMIAN A, NICOLSON R J, IOSIF D. State of Art in Life Extension of Existing Offshore Structures[C]//Proceedings of the ASME 2012:31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 2: Structures, Safety and Reliability. 2012:165-174.

[21] GHOLIZADEH S, LEMAN Z, BAHARUDIN B T H T. A review of the application of acoustic emission technique in engineering [J]. Struct Eng Mech, 2015,54(6): 1075-1095.

[22] HUSSIN M, CHAN T H T, FAWZIA S,et al. Identifying the prestress force in prestressed concrete bridges using ultrasonic technology[J/OL]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2020, 20(10)[2024-09-19]. https://doi.org/10.1142/s0219455420420146.

[23] 曾滨,许庆. 检测无黏结预应力混凝土结构中预应力值的方法:CN201711439077.9[P]. 2019-03-29.

[24] KIM J T, RYU Y S, YUN C B,et al. Vibration-based method to detect prestress loss in beam-type bridges[C/OL]. Proceedings of SPIE: the International Society for Optical Engineering 5057. 2003 [2024-09-19]. https://doi.org/10.1117/12.484638.

[25] 尚仁杰,曾滨,荣华,等. 应力释放法检测混凝土应力的标准化方法研究[J]. 工业建筑,2022,52(11):151-156.

[26] GUO W L, LIANG P, LIU H X, et al. An evaluation method for effective prestress of simply supported prestressed concrete beams with breathing cracks[J/OL]. Advances in Civil Engineering, 2021(1)[2024-09-19]. https://doi.org/10.1155/2021/8876093.

[27] 李世安,贺拴海,娄诚,等. 基于横张增量法的 PC 梁桥现存应力测试与评估[J]. 长安大学学报(自然科学版),2012,32(2):70-73,81.

[28] NGUYEN T T, HOANG N D, NGUYEN T H, et al. Analytical impedance model for piezoelectric-based smart strand and its feasibility for prestress force prediction[J/OL]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(11)[2024-09-19]. https://doi.org/10.1002/stc.3061.

[29] JOH C B, LEE J W, KWAHK I J. Feasibility study of stress measurement in prestressing tendons using Villari effect and induced magnetic field[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013(3/4):1-8.

[30] ZHOU Z, HE J P, CHEN G D,et al. A smart steel strand for the evaluation of prestress loss distribution in post-tensioned concrete structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2009,20(16): 1901-1912.

[31] 尚仁杰, 黄其华, 李谦. 使用 19 年的预应力混凝土结构现存预应力值检测与统计分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(4): 79-82.

[32] ESTEVA L, DÍAZ-LÓPEZ O J, VÁSQUEZ A, et al. Structural damage accumulation and control for life cycle optimum seismic performance of buildings[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2016, 12(7): 848-860.

[33] BISCHOFF P H. Deformation model for reinforced and cracked prestressed concrete[J]. ACI Structural Journal,2022,119(1): 243-254.

[34] GJØRV O E. Durability of concrete structures[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2011,36(2): 151-172.

[35] 孙洋, 陈涛, 赵卓. 病害预应力混凝土梁桥结构承载能力评估[J]. 世界桥梁, 2016, 44(4):87-91.

[36] 赵煜,贺拴海,李春风,等. 在役预应力混凝土箱梁开裂后承载力评估[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(9):1271-1275.

[37] 王宇威,潘钻峰,曾滨,等. 疲劳荷载作用对预应力长期损失影响试验研究与理论分析[J/OL]. 工程力学,2023-10-25[2024-09-19]. https://doi.org/10.6052/j.issn1000-4750.2023.05.0381.

[38] GARBER D B, GALLARDO J, DESCHENES D J,et al. Prestress loss calculations: another perspective[J]. PCI Jounrnal,2016,61(3): 68-85.

[39] 张开银, 郭志伟, 顾津申,等. 预应力混凝土结构弯曲孔道预应力损失研究[J]. 固体力学学报, 2008, 29(增刊 1):127-131.

[40] PÁEZ P M, SENSALE B. Improved prediction of long-term prestress loss in unbonded prestressed concrete members[J]. Engineering Structures, 2018, 174: 111-125.

[41] 曾滨,徐曼,许庆. 预应力筋/索非线性疲劳-松弛应力理论模型与计算方法[J]. 土木工程学报,2022,55(9):1-8.

[42] 曾滨,潘钻峰,曹栋,等. 不同应力水平对混凝土徐变性能的影响[J]. 工业建筑,2019,49(11):163-168.

[43] MADSEN H O, BAZANT Z P. Uncertainty analysis of creep and shrinkage effects in concrete structures[J]. ACI Journal, 1983, 80(2): 116-127.

[44] 许庆,曾滨,徐晓达,等. 基于高斯混合模型的混凝土结构预应力分布特征及估计方法[J]. 建筑结构学报,2022,43(10):60-67.

[45] 许庆,李嘉伟,曾滨,等.基于实测预应力值的既有混凝土构件性能推定方法[J].工业建筑,2024,54(8):1-8.

[46] GHOSH M, MUKHOPADHYAY N, SEN P K, et al. Sequential estimation[M]. Hoboken:John Wiley & Sons, 2011.

[47] 许庆,曾滨,徐晓达,等.基于序贯理论的混凝土结构有效预应力实测概率估计方法[J].建筑结构学报,2024,45(7):100-107.

[48] KEITEL H, DIMMIG-OSBURG A. Uncertainty and sensitivity analysis of creep models for uncorrelated and correlated input parameters[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3758-3767.

[49] DRAPER D. Assessment and propagation of model uncertainty [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology,1995,57(1): 45-70.

[50] JENKINS C, KHANNA S. Mechanics of materials: a modern integration of mechanics and materials in structural design[M]. Salt Lake City:American Academic Press, 2005.

[51] WU K D, QIANG X H, XING Z, et al. Buckling in prestressed stayed beam-columns and intelligent evaluation[J/OL]. Engineering Structures, 2022,255(15)[2024-09-19]. https:/doi. org/10. 1016/j. engstruct. 2022. 113902.

[52] REHDER J, SIEGWART R, FURGALE P. A general approach to spatiotemporal calibration in multisensor systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016,32(2): 383-398.

[53] RUIZ A P, FLYNN M, LARGE M,et al. The great multivariate time series classification bake off: a review and experimental evaluation of recent algorithmic advances[J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 2021,35: 401-449.

[54] NASER M Z, KODUR V, THAI H T,et al. StructuresNet and FireNet: Benchmarking databases and machine learning algorithms in structural and fire engineering domains[J/OL]. Journal of Building Engineering, 2021,44[2024-09-19]. https://doi. org/10. 1016/j. jobe. 2021. 102977.