

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.112

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



桥梁评估与加固理论 2019 年度研究进展

张方^{1,2}, 黄俊豪¹, 金聪鹤¹, 徐望喜¹, 龚婉婷¹, 钱永久¹

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要:综合运用现代测试手段、试验技术、评估理论、结构理论、数值仿真、数学统计预测等理论方法和技术手段,对既有桥梁在剩余服役期内的安全性和适应性给出评判,提出维护策略及加固方法,是桥梁工程的重要研究领域。基于该领域最新研究进展,对基于时变理论的既有桥梁可靠性评估方法、结合工程应用的可靠度计算方法、维修加固的策略、钢筋混凝土墩柱的抗震性能及其抗震加固、桥梁加固的新材料、新方法和新装备等研究进行了介绍和总结,并从对既有结构性能衰变的认识、发展新的理论与方法、根据实际需求拓展新的研究领域等方面对研究提出了展望。

关键词:桥梁评估;桥梁维修;桥梁加固;时变可靠度;桥梁抗震;结构性能衰变

中图分类号:U445.7 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0076-13

State-of-the-art review of bridge assessment and reinforcement theory in 2019

Zhang Fang^{1,2}, Huang Junhao¹, Jin Conghe¹, Xu Wangxi¹, Gong Wanting¹, Qian Yongjiu¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, Hebei, P. R. China)

Abstract: It is an important research field of bridge engineering to evaluate the safety and adaptability of existing bridges during the remaining service period and put forward maintenance strategies and reinforcement methods, that to put forward maintenance strategies and reinforcement methods, by using modern testing methods, testing technology, evaluation theory, structural theory, numerical simulation, mathematical statistical prediction and other theoretical methods and technical means comprehensively. Based on the literature of 2019, this paper introduces and summarizes the reliability evaluation method of existing bridges based on time-varying theory, reliability calculation method combined with engineering application, maintenance and reinforcement strategy, seismic performance and seismic reinforcement of reinforced concrete pier columns, new materials, new methods and new equipment of bridge reinforcement, etc., in addition, the research prospect is put forward from the aspects of the understanding of the existing structure performance decay, the development of new theories and methods, and the expansion of new

收稿日期:2020-04-07

基金项目:国家自然科学基金(51778532);河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室开放基金(2016)

作者简介:张方(1974-),男,博士,主要从事既有桥梁结构的评估、诊断与加固理论、桥梁文化遗产规划和保护以及大跨度桥梁的施工监控和健康监测研究, E-mail: fangzhang@swjtu.edu.cn.

Received:2020-04-07

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51778532); Open Fund of Hebei Key Laboratory of Diagnosis Reconstruction and Anti-disaster of Civil Engineering(2016)

Author brief: Zhang Fang (1974-), PhD, main interests: evaluation, diagnosis and reinforcement theory of existing bridge, planning and protection of bridge cultural heritage, construction monitoring and health monitoring of long-span bridges, E-mail: fangzhang@swjtu.edu.cn.

research fields according to the actual needs.

Keywords: bridge assessment; bridge maintenance; bridge reinforcement; time varying reliability; bridge seismic resistance; structure performance decay

近年来,中国桥梁建设成绩斐然。随着 2018 年港珠澳大桥建成通车,一批举世瞩目的特大桥梁,如武汉杨泗港长江大桥、广东虎门二桥坭洲水道桥、福建平潭海峡公铁两用大桥也相继建成通车,2020 年江苏五峰山长江大桥、江苏沪通长江大桥等还将通车。回望改革开放四十余年,中国桥梁事业取得了突飞猛进的发展。截至 2018 年底,中国共有公路桥梁 85.15 万座,其中特大桥梁 4 000 余座,估计未来每年还将新增 2~3 万座;铁路桥梁 6.5 万座,其中高速铁路桥梁建设成就特别突出;市政桥梁与特种桥梁也有快速的发展,城市立交桥与人行桥梁的建设日新月异。在桥梁建设取得巨大成就的同时,大量的既有桥梁既是巨大的固定资产和社会财富,同时,为保证桥梁运行安全和合理的使用寿命,每年的检测、监测、评估、维护和加固需要消耗大量的人力、物力。该领域的工作既是复杂的技术问题,也是影响经济发展和人民生活的社会问题。

影响既有桥梁安全和合理使用的主要因素包括:桥梁的老化问题,相对于中国桥梁的一般设计年限(公路 50 或 100 年,铁路 100 年),相当一部分桥梁已进入老化期,较多的桥梁表现出耐久性不足的问题;日益增长的交通运输量使桥梁安全问题日益凸显;普遍存在的超载现象加剧了桥梁的损伤和安全隐患;大量的桥梁带病工作,承载力不足的桥梁或危桥的数量逐年上升;各类自然与人为灾害对桥梁造成的伤害危及桥梁的正常使用安全;现代交通系统的升级改造对既有桥梁的长期使用提出了新的要求。针对上述问题开展桥梁结构评估和加固维修理论与技术研究是目前研究的热点之一,具有重要的理论研究前景和应用价值。

1 基于时变理论的既有桥梁可靠性评估方法

既有结构在剩余服役期内的安全性不仅与结构自身状态有关,还与结构所处的服役环境、管养维护条件、经受荷载特性有关。一般不宜直接采用现行的设计准则对既有结构进行评估。既有结构与拟建结构的区别主要体现在以下几个方面:

1)既有结构已在一定荷载作用下服役了一段时

间。“一定荷载”表明结构抗力进行了荷载的验证作用,减少了抗力的随机性;“一段时间”表明结构评估基准期与设计基准期不同。评估基准期的确定与结构当前特性、环境条件以及预期的使用要求有关。

2)既有结构为一客观实体,可通过科学的方法或先进的测量仪器来减少因材料不确定性、尺寸不确定性、认识模糊性而引起当前结构抗力的随机性。

3)既有结构会发生随时间变化的损伤和性能衰退,影响结构的可靠性。

围绕结构抗力和作用的研究是桥梁结构状态评估的关键所在。抗力和作用均具有时随性,采用随机过程理论来对结构进行可靠性分析符合客观规律。由于随机过程理论的复杂性,不便于实际应用,工程上往往采用给定一时间域,将荷载与抗力的随机过程在时间域内转化为随机变量进行简化处理。

常用的荷载随机过程有平稳二项分布、滤过泊松过程、滤过威布尔随机过程等。Wang 等^[1]研究表明,现有在役桥梁抗力采用随机过程进行描述时,均假定抗力随机过程模型为不相关或者全相关模型,这与客观实际差距较大,故提出了基于 Gamma 随机过程、考虑抗力衰减相关性的抗力模型。叶新一等^[2]采用 Taylor 级数展开了由 Mori-Ellingwood 等提出的时变可靠度公式,取其一阶矩进行可靠度计算,将可靠度积分简化为代数方法,提升了效率。潘晨等^[3]基于全寿命周期的成本最小准则不能反应决策者主观风险态度不足的特性,采用效应理论模型探讨主观态度对地震风险决策的影响,并计算了地震保险费受人类主观因素的决定作用。刘强等^[4]采用等效线性化与随机平均方法,推导出了首次超越破坏时间的结构失效概率分布函数,对结构非线性动力系统的首次超越破坏问题进行了研究。文献[5-6]基于 Monte-Carlo 伪随机试验方法,采用 Copula 函数,考虑失效模式相关性,进行系统时变可靠度分析。另有樊学平等^[7]基于健康监测时间序列数据,采用贝叶斯动态线性模型为粒子滤波器提供随时间更新的动态建议分布,提出了桥梁动态可靠度指标的改进粒子滤波预测方法。

结构领域的一些研究也具有典型性。Gong 等^[8]基于随机过程理论和一次二阶矩方法,提出了

考虑剪力影响的分层建筑时变可靠度研究方法。Keshtegar 等^[9]采用 Armijo 线性数学规划方法,提出了一种基于可靠度理论的结构健康检测方法。Wang 等^[10]基于结构本身的不确定性和偶然性,提出了主动控制结构的混合时变可靠性估计方法。Wang 等^[11]采用 Fourier 级数方法,拓展了基于力矩数值的结构可靠度算法,通过随机过程理论,提出了荷载-时间相关性和劣化荷载相关性在结构时变可靠度中的一种应用方法^[12]。Li 等^[13]基于相位分布原理提出了结构抗力分布的拟合方法。Soltanian 等^[14]基于首次穿越理论(first passage theory)提出了铁路枕轨考虑锈蚀因素的时变可靠度算法。

2 结合工程应用的可靠度计算方法

结合工程应用的可靠度计算方法研究比理论研究多。从考虑的因素看,涵盖了时变效应、徐变效应、锈蚀、荷载裂缝、碳化等桥梁结构性能劣化的主要因素,并针对混凝土桥、钢桥、加固加宽后桥梁结构等结构形式研究了基于实际工程的可靠度计算方法。

彭建新等^[15]考虑氯盐环境、混凝土时变效应、腐蚀电流密度及氯离子侵蚀过程等因素的不确定性,建立了预应力混凝土箱梁桥的时变可靠度模型,研究了时间、腐蚀电流密度及保护层厚度等参数对结构承载力的影响,计算了该梁桥在 100 年设计期内的失效概率,并开展了参数敏感性分析。徐卫敏等^[16]考虑钢板锈蚀对水工钢闸门结构抗力和刚度退化的影响,采用 Gamma 随机过程提出了考虑锈蚀因素的可靠度分析方法。赵阳阳等^[17]基于多级荷载作用下的剩余强度模型,建立了时变疲劳可靠度极限状态函数,并基于 Monte Carlo 方法给出了正交异性钢板的疲劳时变可靠度模拟方法。陈龙等^[18]基于 Bayesian 理论,采用 Poisson 随机过程描述车载效应,得出了退化数据集的联合分布,并依据先验分布为正态分布的假设,给出了混凝土梁桥动态可靠度的预测方法。郭弘原等^[19]基于概率密度演化算法,提出了锈蚀钢筋混凝土梁极限状态函数的建立方法,并预测其时变可靠度。文献^[20-21]分别采用 Monte-Carlo 方法和支持向量机法,对加宽混凝土梁桥的时变可靠度进行了研究。张凯健等^[22]基于再生骨料变异性强的特点,通过时变可靠度理论对再生混凝土梁进行了可靠度分析,并对再生混凝土梁的配筋率进行了讨论。刘威等^[23]基于

大气锈蚀模型和简支檩条的屈曲计算理论,提出了台风作用引起的檩条锈蚀时变可靠度计算方法。邹红等^[24]基于钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁设计规范,考虑箱梁的徐变效应,提出了预应力箱梁跨中截面拱变形功能函数,并以此开发了基于三阶矩法的箱梁上拱变形时变可靠度计算方法。杨思昭等^[25]分别基于一般大气环境下锈蚀钢筋界面损失的时变模型,以及抗剪、抗弯承载力退化模型,建立了考虑其随机性的极限状态方程,引入边界吸收条件,提出了退化钢筋混凝土梁的时变可靠度算法。杨慧等^[26]分析了碳化混凝土表面的氯离子累积效应、荷载裂缝及其对氯离子侵蚀的加速作用,根据 Fick 定律得到了不同服役期对应抗力的概率密度函数,采用 Monte Carlo 方法对钢筋混凝土梁提出了考虑碳化和氯离子累积共同作用的时变可靠度算法。

随着 AI 技术进入新的发展时期,智能评估获得了推动。计算机视觉技术与远程摄像机和无人机采集结合的非接触式解决方案因深度学习带来了技术核心上的突破而获得了较快的发展^[27]。检查类的应用涵盖了环境识别^[28]、构件特征及损伤识别^[29-30];监测应用包括应变和位移的静态变化和用于模态分析的位移动态变化^[31]。研究集中于将基于视觉方法取得的特征和信号转换为可操作的数据,从而成为快速决策的基础。张清华等^[32]提出了基于等效结构应力的正交异性钢桥面板多尺度疲劳损伤评估方法,建立了考虑随机因素的结构体系实时疲劳损伤评估及剩余寿命预测方法,构建了正交异性钢桥面板疲劳损伤智能监测与评估系统,基于实际桥梁结构的交通量和结构响应监测信息,对所建立的正交异性钢桥面板疲劳损伤智能监测与评估系统进行了验证。吴焜^[33]以桥梁 BIM 模型为平台结合数据库技术将桥梁检测全过程相关信息在 BIM 模型中集成,为桥梁评估提供了解决方案。

3 维修加固策略

从物质和资金的角度看,在役桥梁的评定最终是为维修、加固及拆除重建提供决策依据。而这实际上已经远不只是一个工程技术问题,或者一个经济问题,这是一个复杂的社会问题。怎样建立具有中国市场经济特征的桥梁维修、加固及拆除重建的技术经济分析模型,合理利用有限养护资金,综合考虑近、远期经济效益和社会效益,已成为困扰桥梁管

理养护部门的技术难题^[34]。在役桥梁维修优化理论研究的目的是协调结构安全性与经济性的矛盾,以保证结构在全寿命周期内达到投资效益最佳。

Frangopol 等^[35]认为,桥梁管理的目的是有效利用有限的资金在全寿命成本和全寿命可靠性之间达到平衡。Liu 等^[36-37]基于遗传算法,进行了同时最小化桥面板前侧维护成本和劣化成本的多目标优化研究,并运用于交通网络中多座桥梁的桥面板维护优化中。Kim 等^[38]考虑结构检测维护中的不确定性,以最大化结构使用寿命以及最小检测维护成本为目标函数,优化计算得到结构的检测维护时间以及维护措施。桥梁的维修检测模型被认为是多目标优化,实际上,这些目标一般都是相互制约,甚至相互矛盾^[39]。Horn 提出了基于 Pareto 概念的对比选择方法——小生境 Pareto 遗传算法,综合运用联赛选择和共享函数的思想来选择当前种群中的优良个体遗传到下一代种群中,实现了多个目标无偏好优化。边晶梅^[40]提出了一种基于交互式多目标遗传算法的桥面板维修优化方法,能在有限的桥梁维修资源和良好的维修效果之间进行折衷,不仅获得比较理想的维修方法组合,降低了维修策略的选择难度。随着时间的不断增加,在荷载和环境因素耦合作用下,桥梁结构的使用性能不断退化^[41-42]。加上荷载与环境因素的不确定性,考虑这种不确定性及退化过程对于桥梁的决策具有重要意义。在役桥梁结构检测维护模型具有时变特性,结构抗力的退化模型也成为了检测维护优化模型的基础。周浩^[43]基于 Gamma 随机过程描述钢筋锈蚀变化过程,建立了以桥梁使用寿命以及维护成本为目标函数,以检测维护时间、检测方法以及维护措施决策准则为设计变量的桥梁检测维护策略优化模型,采用多目标遗传算法计算得到设计变量的 Pareto 解集,为检测维护策略提供依据。黄天立等^[44]基于 Gamma 随机过程和 Matlab 遗传算法工具箱,提出锈蚀钢筋混凝土桥梁结构检查养护策略优化分析方法,并得到可提供在不同结构使用寿命期望和检查养护成本预算下收益最大的检查养护策略和 Pareto 优化解集。

传统的维修方式多以定期维修和事后维修为主,主要具有管理简单、便于实施的特点。但也容易造成维修过剩与维修不足的后果^[45]。近年来,孙马等^[46]提出了以桥梁预防性养护经济性、安全性及耐久性为目标的层次评价分析模型,建立了关于桥梁

预防性养护的模糊综合评价体系。预防性概念在提出来以后,在道路的路面养护上得到了应用^[47-50]。颜全哲等^[51]以桥梁寿命养护活动总成本最小为优化目标,结合遗传算法研究混凝土梁桥的养护优化策略,得到混凝土梁桥寿命周期内在结构性能指标接近最低限值时进行纠正性养护,可使寿命周期成本显著减少。

4 桥梁加固理论与方法

从桥梁加固行业来讲,混凝土桥加固占比最大,其中又以纤维增强复合材料(FRP)加固混凝土结构为最多,研究的热点亦是如此。

4.1 抗弯加固研究进展

陈绪军等^[52]在 BFRP/CFRP 两种材料加固 RC 梁的静载抗弯试验中研究多因素对试验梁短期挠度和刚度的影响;基于刚度解析法,将 FRP 片材截面积折算为纵筋面积,建立了 FRP 片材加固 RC 梁短期抗弯刚度计算公式。方圣恩等^[53]考虑受压区混凝土非线性应力变化,选取 Hognestrand 本构模型以推导 FRP 加固 RC 梁受压混凝土等效应力和受压区高度各自相对应比值,进而得到不同破坏模式下的梁正截面极限抗弯承载力计算公式。Zawam 等^[54]制作 12 根 GFRP 预应力混凝土梁使用杠杆悬重方法进行长期持荷试验,研究不同因素对梁的长期力学性能的影响。

4.2 抗剪加固研究进展

付一小等^[55]采用 CFRP 混合粘贴(HB-FRP)加固钢筋混凝土 T 梁抗剪试验,发现混合(HB-FRP)加固技术提高单根 CFRP 布抗剪贡献并延缓其剥离过程,在挠度变形、混凝土裂缝抑制、箍筋受力改善和 CFRP 材料利用率等方面均优于传统外贴(EB-FRP)加固方式。

4.3 粘结界面问题研究进展

刘兴喜等^[56]基于最小余能原理推导 FRP 加固损伤 RC 梁粘结层剪应力分布的解析公式,该公式在对称、非对称等不同工况下均有较高精度。高磊等^[57]设计 5 组 HB-FRP 混合加固混凝土结构的粘结作用组合试验,基于试验实测数据推导了 FRP-混凝土界面粘结-滑移模型和粘结荷载表达式;并在试验基础上建立了考虑混凝土塑性损伤、界面粘结效应的 HB-FRP 加固数值计算模型^[58];基于三折线粘结-滑移模型开展了侧向约束下 FRP-混凝土粘结界面剥离全过程分析,推导了 FRP-混凝土界面粘结荷

载表达式^[59]。罗威等^[60]对 60 个标准试件进行快速荷载下的正拉试验,研究加载速率、FRP 种类、混凝土强度对 FRP-混凝土界面正拉粘结强度的影响,基于试验结果推导考虑应变率效应的正拉粘结强度预测模型。刘钰中^[61]基于胶层内力满足 Timoshenko 梁理论的假定,推导外贴 FRP 加固梁中胶层应力的理论计算改进模型。胡波等^[62]基于 Xia-Teng 模型对 FRP-钢界面有效粘结长度设计方法提出了分析建议。汤显廷^[63]通过试验研究 FRP 斜向 U 型箍加固下复材底板与混凝土界面的基础粘结性能,以及 FRP 斜向 U 型箍对梁中部剥离破坏的影响。李晓琴等^[64]基于 LS-DYNA 子程序,考虑界面本构非线性关系及滑移速率效应对界面剪切模态断裂能的影响,建立中低速荷载作用下 FRP-混凝土界面的动态粘结-滑移本构关系。钱聪^[65]基于 Abaqus 软件建立 CFRP 抗弯加固 RC 梁及双剪试验分析模型,修正了混凝土在双向应力状态下的名义主应力和加固梁在 CFRP 端部处的剥离破坏准则;推导了各工况下考虑材料时变性能的加固梁剥离破坏承载力理论公式。Shi 等^[66]使用不同类型的胶粘剂对 FRP-混凝土双塔搭接剪切试件进行试验,基于试验结果建立了包含胶层的有限元分析模型,得到了考虑粘弹性模量的 FRP-混凝土界面粘结-滑移模型。Zhou 等^[67]改进 HB-FRP 的锚固装置研究 FRP-混凝土界面在不同扭矩下的粘结行为,基于试验结果建立了 FRP-混凝土界面在不同扭矩下的粘结强度模型。

4.4 环境因素影响的加固研究进展

陈雨唐等^[68]通过双面剪切试验研究冻融循环和持续荷载共同作用下 FRP 片材-混凝土界面黏结性能的退化行为,使用数字图像相关法量测试件表面的全场位移,基于试验数据建立 FRP 片材-混凝土界面黏结-滑移本构关系。刘生纬^[69]通过 CFRP 片材在室温、硫酸盐持续浸泡、硫酸盐干湿循环作用下的相关试验研究,推导了硫酸盐环境下的混凝土抗压强度衰减模型、CFRP-混凝土界面承载力模型和 CFRP-混凝土界面粘结-滑移本构模型。李东洋^[70]利用数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术测定混凝土裂纹尺寸、观测 RC 试件及碳纤维薄板(Carbon Fiber Laminate, CFL)加固 RC 梁中疲劳裂纹的萌生、扩展过程,提出了计算湿热环境下加固梁疲劳主裂纹的应力强度因子的有限元方法。罗姗姗^[71]以碳纤维薄板加固 RC 构件为研究对象,改进温度-海水环境模拟与控制系统,建立氯离

子扩散模型描述其对 CFL 加固 RC 构件的侵蚀机理,在试验基础上建立的温度-海水环境与荷载耦合作用下 CFL 加固 RC 梁的环境疲劳方程可有效预测加固结构的疲劳寿命和疲劳极限。

4.5 新技术、新材料及相近领域研究进展

李恒^[72]使用预应力 CFRP 板条对 RC 梁进行近表层嵌贴加固(Near Surface Mounted, NSM)进行静载破坏和疲劳破坏试验,分析了不同预应力水平、粘结长度和增设无预应力粘结段对加固梁抗弯性能的影响,研究了粘结长度和无预应力粘结长度对加固构件疲劳性能和破坏模式的影响。Ascione 等^[73]介绍了使用聚合树脂粘贴钢纤维材料的复合体系 SRP(Steel Reinforced Polymer),建立了 SRP-混凝土界面粘结-滑移模型。Yang 等^[74]提出了一种预测 FRP 近表层嵌贴加固(Near Surface Mounted, NSM)弯曲受力 RC 梁的非线性分析方法,推导了 FRP MSN 法加固 RC 梁的承载力计算方法。

4.6 纤维增强复合材料(FRP)加固混凝土结构发展展望

多位学者^[75-80]对目前 FRP 加固 RC 结构的研究现状进行综述性总结,认为下一步的研究方向应倾向于 FRP 加固 RC 梁的抗扭性能领域;多环境因素耦合效应对加固结构的力学性能影响;预应力 FRP 加固 RC 梁的研究领域;更精确的有限元数值模拟技术开发;特殊形式的混凝土结构,如:深梁、混凝土墙的轴向加固等;综合考虑加固量、二次受力、预损伤等因素对于加固结构的长期性能影响机理;力学性能更好的复合材料和加固效果更好的新技术的研究;新技术(如传感装置)在 FRP 加固 RC 结构的长期行为研究。

4.7 其他加固方法的研究

在众多桥梁和结构中,有一类桥历史最悠久,桥不大,却与人民生活息息相关;房不高,却为群众遮风挡雨,这就是石(拱)桥、石砌房屋。围绕石砌体加固的研究曾经热过,本年度进展较少。张森^[81]通过试验研究了混凝土-石材粘结截面抗剪强度,提出了“双界面-三区-三层”粘结模型。

毛德均等^[82]对《混凝土结构加固设计规范》GB 50367—2013 和 GB 50367—2006 的承载力计算方法进行了研究,将试件承载力计算值与实测值进行对比,发现两部规范的承载力计算结果比较接近,但计算结果的整体准确性都不够好、偏于不安全,尤其对大偏压柱的承载力计算较不安全。根据加固柱的

受力破坏特性,定义了 3 种破坏极限状态,基于 3 种极限状态下的截面应变分布分析,建立了加固柱的承载力计算公式,验证表明,该公式的计算结果与试验结果吻合较好,且偏于安全。

Liu 等^[83]针对扩建(加宽)桥梁中新旧桥节点之间的连接问题,进行了超高性能混凝土(UHPC)拼接缝的试验与有限元分析,结果表明,增加接头的自由长度或减小接头的厚度能有效提高接头的抗弯强度。在实验和分析的基础上,提出了板与梁之间的非连接节点形式,并给出了这种非连接接头形式的详细加固方案。Sakr 等^[84]使用二维模型对 UHPFRC 和 UHPFRC(R-UHPFRC)套箍对钢筋混凝土剪力墙的性能进行了数值分析,并结合粘结应力滑移模型对混凝土-混凝土粘结界面进行模拟。

5 钢筋混凝土墩柱的抗震性能及其抗震加固

5.1 预应力 CFRP 加固混凝土柱的研究

Zhou 等^[85]对预应力 CFRP 条带加固大尺寸钢筋混凝土柱进行了实验研究,结果表明,采用预应力 CFRP 条带加固大尺寸钢筋混凝土能极大提高构件的承载力和延性,并基于试验数据提出了预应力 CFRP 加固大尺寸钢筋混凝土柱的应力-应变关系模型。Janwaen 等^[86]对预应力 CFRP 条带加固 RC 方柱与普通 CFRP 加固 RC 方柱进行了试验,结果表明,截面的长宽比可以显著影响 CFRP 的加固效率,采用预应力 CFRP 加固的构件性能好于普通 CFRP 加固构件。

5.2 钢筋混凝土柱滞回模型研究

李柔含等^[87]研究了动力效应对柱抗震性能的影响,建立了能同时考虑最大位移与循环加载次数对钢筋混凝土柱损伤退化指标的影响。杨淑艳^[88]提出锈蚀钢筋混凝土柱的滞回模型,从细观角度提出了往复荷载作用下筋端锚固区锈蚀钢筋与混凝土粘结-滑移本构模型。王震等^[88]基于 Ibarra-Medina-Krawinkler 模型提出了弯剪破坏钢筋混凝土矩形墩滞回模型,引入捏拢效应参数和滞回性能退化参数描述捏拢效应和滞回性能退化。邴鹏^[89]研究了钢筋混凝土圆柱在单调加载和不同加载循环次数的反复加载下的抗震性能研究,提出了一种同时考虑塑性变形和加载循环次数影响的钢筋混凝土圆柱受剪承载力计算模型。张艳青等^[90]总结了近年学者们对经典恢复力模型的修正和改造,提出了一种可以

同时考虑轴力和侧向荷载变化的恢复力模型。为了准确模拟 RC 矩形空心桥墩的刚度退化特性,为桥梁震后可恢复性能研究提供理论基础,黎璟^[91]等进行了不同设计参数的 14 个 RC 矩形空心墩模型拟静力试验,通过引入峰值位移影响系数体现刚度退化与峰值位移的关联,建立修正的 Bouc-Wen-Baber-Noori (BWBN)滞回模型;基于粒子群-引力搜索混合智能优化算法(PSOGSA)识别实测滞回曲线对应的滞回参数,并建立桥墩设计参数与滞回参数间的对应关系,进而总结滞回参数的经验预测方法。

5.3 约束钢筋混凝土柱本构模型研究

劳晓杰等^[92]设计了以配箍率、CFRP 层数、预损伤水准的 29 个 RC 方柱的轴压试验。通过对试验数据的分析,提出了 CFRP 约束损伤钢筋混凝土的受压本构模型。曹玉贵^[93]基于已发表的 FRP 约束混凝土柱的应力-应变关系曲线,拟合出不受形状限制的应力-应变统一模型。在试验数据的基础上提出考虑应变速率的应力-应变关系模型和抗压强度模型。

5.4 FRP 加固钢筋混凝土柱塑性铰研究

王震等^[88]对 48 根弯曲破坏的矩形空心墩拟静力试验结果进行分析,考虑剪切变形引入空心率的影响,提出了矩形空心墩等效塑性铰的建议模型。张艳青^[94]通过截面分析从理论上分别确定了弯曲、弯剪破坏形态的钢筋混凝土柱塑性铰模型。邵长江等^[95]基于试验和既有研究结果,以轴压比、剪跨比、纵筋及混凝土强度、配筋率及延性系数等位参数回归得到不同类墩柱塑性铰区约束箍筋用量的简化公式。

6 结论与展望

总体而言,在既有桥梁的评估和加固领域已从理论到工程实践逐步建立了科学体系和技术方法系统。但是,随着基本建设阶段性发展形势的不断变化,该领域仍前路崎岖。中国在该领域的研究者应该站在巨人的肩膀上,紧紧抓住交通强国战略和中国大力推进桥梁评估、智能维护的历史机遇,引入数学、力学、理论分析、试验检测技术、加工制造技术和人工智能等领域的最新成果,在基础理论和重大工程应用两方面继续努力,进一步深化对既有结构性能衰变的认识,发展新的理论与方法,根据实际需求拓展新的研究领域,通过创新性成果为桥梁的可持

续发展建立更为完备的保障体系。以下几个方面的研究对于深化既有桥梁的评估和加固问题具有重要的推动作用,是下一阶段的研究重点。

6.1 桥梁结构全生命周期性能演变理论

既有桥梁在其服役的长期过程中性能会发生不同程度的衰退。衰退的成因主要包括:结构本身的时变效应、材料的时变效应、环境对结构或材料的影响、长期荷载和交变荷载对结构的影响、结构的损伤及演变等,如何针对不同的成因开展理论与实验研究,建立相应的计算分析模型,还有许多工作有待完成。

6.2 基于可靠度的桥梁加固设计理论

桥梁加固设计理论与新建桥梁设计理论最本质的不同是拟加固的桥梁包含有新材料与老材料(组合结构体系)、老结构因经历长期的使用而承受了不同等级荷载的检验(影响结构的失效概率)、既有结构已完成了一定的服役期(影响加固结构的设计寿命)、既有结构或材料含有不同程度的损伤或性能衰变(影响结构的安全)。综合考虑上述因素建立相应的桥梁加固设计理论需要开展大量的基础研究。

概略地说,该领域的研究未来可分为两个层次,第1个层次是结合现阶段可靠性设计理论的发展水平和设计规范现状,建立可供未来修订桥梁加固设计规范使用的基于可靠性的桥梁加固设计理论;第2个层次是综合考虑结构损伤演变的基于可靠性的全寿命桥梁加固设计理论,该方面的研究相对会困难一些。

6.3 加固桥梁的时变效应及分析方法

由于加固桥梁通常含有新旧两种材料,在组成新结构并共同受力的过程中,新材料与老材料的性能均会随时间发生变化。时变效应产生的主要原因包括新的结构材料与粘结材料本身所具有的时变效应、加固方式引起既有结构性能的改变、加固后新结构性能演变规律。目前在该领域的研究还很不充分。

6.4 既有桥梁全寿命周期大数据库与基于人工智能的管理专家系统

该方面的研究主要包括建立一套开放性的、可升级的、可扩展的数据管理与数据分析系统,制定数据采集、采集和质量保证的标准,将国家按地域分区,收集不同区域的桥梁的科学数据,实时建立桥梁健康数据库,通过区域分工,对桥梁进行周期性的详细检查、监测和评估,同时,建立基于人工智能的桥

梁评估与管理的专家系统,通过实时数据得出桥梁的评估结论与管理建议。该方面的研究量大面广,需要国家层面的支持。

6.5 重大桥梁结构预防性养护维修策略研究

目前,中国桥梁养护维修的现状还基本是头痛医头、脚痛医脚的方式,即发现桥梁出现了较严重的问题后,开始进行桥梁的检测与维修加固工作,此时桥梁的损伤通常已较严重,维修与加固的费用也相对较高,桥梁的安全程度也会不同程度地降低。若在早期能够及时发现可能存在的隐患,并及时加以处理,就可以避免出现类似情况,这类似人类的平时保健与病重就医的情形。目前在该领域的理论与试验研究均还较少,相应地,也缺乏对工程实践的有效指导。

参考文献:

- [1] WANG C, FENG K R, ZHANG L, et al. Estimating the resistance of aging service-proven bridges with a Gamma process-based deterioration model [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2019, 6(1): 76-84.
- [2] 叶新一, 王草, 李全旺. 桥梁结构时变可靠度计算的新方法[J]. *工程力学*, 2018, 35(11): 86-91.
YE X Y, WANG C, LI Q W. New method for calculation of time-dependent reliability of RC bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(11): 86-91. (in Chinese)
- [3] 潘晨, 李全旺. 考虑主观风险态度的建筑结构地震风险决策[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(9): 121-128.
PAN C, LI Q W. Seismic risk decision-making of building structures considering subjective risk attitude [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(9): 121-128. (in Chinese)
- [4] 刘强, 王妙芳. 基于首次超越破坏时间概率的结构动力可靠性分析[J]. *应用力学学报*, 2019, 36(2): 480-484, 517.
LIU Q, WANG M F. The reliability analysis of structures based on failure probability of first-passage time [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(2): 480-484, 517. (in Chinese)
- [5] 祁辉, 魏毅. 基于多元 Copula 函数的串联系统应力-强度模型可靠度的非参数估计[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2018, 64(3): 269-277.
QI H, WEI Y. Nonparametric estimation for the reliability of a series system stress-strength model based on multiple Copula function [J]. *Journal of Wuhan*

- University (Natural Science Edition), 2018, 64(3): 269-277. (in Chinese)
- [6] 郭亚洲, 张淑华. 基于 copula 的失效模式相关的系统可靠度研究[J]. 水道港口, 2018, 39(6): 739-745.
GUO Y Z, ZHANG S H. Copula-based failure mode-related system reliability study [J]. Journal of Waterway and Harbour, 2018, 39(6): 739-745. (in Chinese)
- [7] 樊学平, 屈广, 刘月飞. 桥梁时变可靠度指标的改进粒子滤波预测算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1115-1122, 1130.
FAN X P, QU G, LIU Y F. Improved particle filter prediction algorithm of time-variant reliability indices for bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(8): 1115-1122, 1130. (in Chinese)
- [8] GONG C Q, FRANGOPOL D M. An efficient time-dependent reliability method [J]. Structural Safety, 2019, 81: 101864.
- [9] KESHTEGAR B, CHAKRABORTY S. An efficient-robust structural reliability method by adaptive finite-step length based on Armijo line search [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 172: 195-206.
- [10] WANG L, XIONG C, WANG X J, et al. Hybrid time-variant reliability estimation for active control structures under aleatory and epistemic uncertainties [J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 469-492.
- [11] WANG C, ZHANG H, LI Q W. Moment-based evaluation of structural reliability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 181: 38-45.
- [12] WANG C, ZHANG H. Roles of load temporal correlation and deterioration-load dependency in structural time-dependent reliability [J]. Computers & Structures, 2018, 194: 48-59.
- [13] LI J X, CHEN J Q, ZHANG X S. Time-dependent reliability analysis of deteriorating structures based on phase-type distributions [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2020, 69(2): 545-557.
- [14] SOLTANIAN H, FIROUZI A, MOHAMMADZADEH S. Time dependent reliability analysis of railway sleepers subjected to corrosion [J]. Structural Concrete, 2018, 19(5): 1409-1418.
- [15] 彭建新, 田亦昕, 阳逸鸣, 等. 除冰盐环境下预应力混凝土箱梁桥可靠度分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(2): 39-44.
PENG J X, TIAN Y X, YANG Y M, et al. Reliability analysis of prestressed concrete box girder bridge under deicing salt environment [J]. Journal of Changsha Communications University, 2018, 34(2): 39-44. (in Chinese)
- [16] 徐卫敏, 卢鹏程, 范兴朗. 基于 Gamma 随机过程的水工钢闸门时变可靠度方法[J]. 浙江建筑, 2018, 35(6): 32-35.
XU W M, LU P C, FAN X L. Method for time-dependent reliability analysis of hydraulic steel gates based on gamma stochastic process [J]. Zhejiang Construction, 2018, 35(6): 32-35. (in Chinese)
- [17] 赵阳阳, 陈敏. 基于时变可靠度理论的正交异性钢板桥面板疲劳分析[J]. 公路, 2018, 63(9): 135-138.
ZHAO Y Y, CHEN M. Fatigue analysis of orthotropic steel bridge deck based on time-varying reliability theory [J]. Highway, 2018, 63(9): 135-138.
- [18] 陈龙, 黄天立. 基于贝叶斯更新的 RC 桥梁可靠度动态预测方法[C]//第 28 届全国结构工程学术会议论文集(第 II 册), 2019(2): 10-15.
CHEN L, HUANG T L. The dynamic prediction method of RC bridge reliability based on Bayesian update [C]// Proceedings of the 28th National Academic Conference on Structural Engineering (II), 2019(2): 10-15. (in Chinese)
- [19] 郭弘原, 顾祥林, 周彬彬, 等. 基于概率密度演化的锈蚀混凝土梁时变可靠性分析[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1): 67-73.
GUO H Y, GU X L, ZHOU B B, et al. Time-dependent reliability analysis for corroded RC beams based on probability density evolution theory [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(1): 67-73. (in Chinese)
- [20] 白应华, 段展鹏, 刘均利. 既有混凝土梁桥加宽改造的时变可靠度分析[J]. 铁道建筑, 2019, 49(7): 32-36.
BAI Y H, DUAN Z P, LIU J L. Time-variant reliability analysis for widened reinforced concrete girder bridge [J]. Railway Engineering, 2019, 49(7): 32-36. (in Chinese)
- [21] 邬晓光, 何启龙, 郑鹏, 等. 基于支持向量机法的混凝土强度对拼宽 T 梁桥时变可靠度影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 33-38.
WU X G, HE Q L, ZHENG P, et al. Influence analysis of concrete strength on time-varying reliability of widening T-beam bridge based on support vector method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2019, 38(5): 33-38. (in Chinese)
- [22] 张凯建, 肖建庄, 袁俊发, 等. 再生混凝土质量控制及梁时变可靠度分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(Sup1):

- 688-692.
ZHANG K J, XIAO J Z, YUAN J F, et al. Quality control of recycled concrete and time-dependent reliability analysis of recycled concrete beams [J]. *Building Structure*, 2019, 49 (Sup1): 688-692. (in Chinese)
- [23] 刘威, 杨娜, 白凡, 等. 锈蚀檩条在台风作用下时变可靠度计算模型[J]. *北京交通大学学报*, 2019, 43(6): 67-74.
LIU W, YANG N, BAI F, et al. Time-dependent reliability calculation model of corroded purlin under typhoon hazard [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2019, 43(6): 67-74. (in Chinese)
- [24] 邹红, 卢朝辉, 余志武. 考虑徐变效应的高速铁路预应力箱梁上拱变形时变可靠度研究[J]. *铁道学报*, 2019, 41(6): 107-114.
ZOU H, LU Z H, YU Z W. Time-dependent camber deformation reliability of high-speed railway PSC box girder considering creep effect [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(6): 107-114. (in Chinese)
- [25] 杨思昭, 王宪杰, 董艳秋等. 一般大气环境下锈蚀钢筋混凝土梁的时变可靠度分析[J/OL]. *计算力学学报*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.O3.20190620.1638.040.html>
YANG S Z, WANG X J, DONG Y Q. Time-dependent reliability analysis of corroded reinforced concrete beams in the atmospheric environment [J/OL]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.O3.20190620.1638.040.html> (in Chinese)
- [26] 杨慧, 何浩祥, 闫维明. 考虑碳化和氯离子累积效应的梁桥时变可靠度[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(6): 71-78.
YANG H, HE H X, YAN W M. Time-dependent reliability analysis on reinforced concrete beam bridge considering carbonization and chloride accumulation effect [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(6): 71-78. (in Chinese)
- [27] SPENCER B F Jr, HOSKERE V, NARAZAKI Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring [J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 199-222.
- [28] CELIK O, DONG C Z, CATBAS F N. Measurement of human loads using computer vision[M]//*Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 191-195.
- [29] BAO Y Q, TANG Z Y, LI H, et al. Computer vision and deep learning-based data anomaly detection method for structural health monitoring [J]. *Structural Health Monitoring*, 2019, 18(2): 401-421.
- [30] LU R D, BRILAKIS I, MIDDLETON C R. Detection of structural components in point clouds of existing RC bridges [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2019, 34(3): 191-212.
- [31] KHALOO A, LATTANZI D. Automatic detection of structural deficiencies using 4D hue-assisted analysis of color point clouds [M]// PAKZAD S. *Dynamics of Civil Structures, Volume 2, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Springer, Cham, 2019: 197-205.
- [32] 张清华, 崔闯, 魏川, 等. 钢桥面板疲劳损伤智能监测与评估系统研究[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(11): 66-77, 112.
ZHANG Q H, CUI C, WEI C, et al. Research on intelligent monitoring and assessment system for fatigue damage of orthotropic steel deck structural system [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(11): 66-77, 112. (in Chinese)
- [33] 吴焜. 基于BIM的桥梁检测信息管理与智能评估系统[D]. 福建 厦门: 厦门大学, 2018.
WU K. *Bridge inspection information management and intelligent assessment system based on BIM* [D]. Xiamen, Fujian: Xiamen University, 2018. (in Chinese)
- [34] 贺栓海, 宋一凡. 桥梁预测评估与维修加固[C]//*全国公路桥梁维修与加固技术研讨会*. 昆明, 2001: 77-82.
HE S M, SONG Y F. Bridge predictive evaluation, maintenance and reinforcement. [C]//*National Highway Bridge Maintenance and Reinforcement Technology Seminar*. Kunming, 2001: 77-82.
- [35] FRANGOPOL D M, KONG J S, GHARAIBEH E S. Reliability-based life-cycle management of highway bridges [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2001, 15(1): 27-34.
- [36] LIU C L, HAMMAD A, ITOH Y. Multiobjective optimization of bridge deck rehabilitation using a genetic algorithm [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 1997, 12(6): 431-443.
- [37] LIU C L, HAMMAD A, ITOH Y. Maintenance strategy optimization of bridge decks using genetic algorithm [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1997, 123(2): 91-100.
- [38] KIM S, FRANGOPOL D M, SOLIMAN M.

- Generalized probabilistic framework for optimum inspection and maintenance planning [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(3): 435-447.
- [39] 杨善学. 解决多目标优化问题的几种进化算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
YANG S X. New evolutionary algorithms for multiobjective optimization problems [D]. Xi'an: Xidian University, 2007(in Chinese).
- [40] 边晶梅. 服役桥梁维修加固决策研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
BIAN J M. Study on maintenance and strengthening decision for deteriorating bridges [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)
- [41] ELLINGWOOD B R. Risk-informed condition assessment of civil infrastructure: state of practice and research issues [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2005, 1(1): 7-18.
- [42] STEWART M G, ROSOWSKY D V. Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks [J]. *Structural Safety*, 1998, 20(1): 91-109.
- [43] 周浩. 基于Gamma过程的桥梁检测维护策略优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
ZHOU H. Study on optimum inspection and maintenance strategy for bridges based on Gamma process [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)
- [44] 黄天立, 周浩, 王超, 等. 基于伽马过程的锈蚀钢筋混凝土桥梁检测维护策略优化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(5): 1851-1861.
HUANG T L, ZHOU H, WANG C, et al. Optimization inspection and maintenance strategy for corrosive reinforced concrete girder bridges based on Gamma process [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(5): 1851-1861. (in Chinese)
- [45] 郭驰名. 基于独立增量过程的视情维修优化方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
GUO C M. Condition-based maintenance optimization with independent increments processes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [46] 孙马, 刘庆阳, 向程龙. 桥梁预防性养护综合评估指标体系研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(Sup1): 899-902.
SUN M, LIU Q Y, XIANG C L. Comprehensive evaluation index system of bridge preventive maintenance [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2013, 32(Sup1): 899-902. (in Chinese)
- [47] 魏振飞. 沥青路面预防性养护规划实例分析[J]. *工程技术研究*, 2019(11): 130-131.
WEI Z F. Example analysis on asphalt pavement preventive maintenance plan [J]. *Engineering and Technological Research*, 2019(11): 130-131. (in Chinese)
- [48] 樊旭英, 高凤春, 王海龙, 等. 基于改进EW-AHP的沥青路面预防性养护评价模型[J]. *公路交通科技*, 2017, 13(9): 8-13.
FAN X Y, GAO F C, WANG H L, et al. A model for asphalt pavement preventive maintenance evaluation based on improved EW-AHP [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2017, 13(9): 8-13. (in Chinese)
- [49] 高凤春. 张家口地区沥青路面预防性养护评价及养护时机研究[D]. 河北 张家口: 河北建筑工程学院, 2017.
GAO F C. Study on the evaluation and timing of asphalt pavement preventive maintenance on Zhangjiakou [D]. Zhangjiakou, Hei bei: Hebei University of Architecture, 2017. (in Chinese)
- [50] 张亮. 沥青路面性能预测及预防性养护技术方案选择分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
ZHANG L. Asphalt pavement performance prediction and analysis of selecting preventive maintenance schemes [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [51] 颜全哲, 魏津昌, 上官萍, 等. 公路混凝土梁桥寿命期养护优化策略分析[J]. *公路交通科技*, 2019, 15(2): 95-102, 150.
YAN Q Z, WEI J C, SHANGGUAN P, et al. Analysis on optimal maintenance strategy for highway concrete girder bridges during service life [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 15(2): 95-102, 150. (in Chinese)
- [52] 陈绪军, 李华锋, 朱晓娥. FRP片材加固的钢筋混凝土梁短期刚度试验与理论研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(1): 146-152.
CHEN X J, LI H F, ZHU X E. Experimental and theoretical research on short-term stiffness of reinforced concrete beams strengthened with FRP sheets [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(1): 146-152. (in Chinese)
- [53] 方圣恩, 武棒棒. 多破坏模式和二次受力影响下FRP加固RC梁抗弯承载力[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(1): 180-188.

- FANG S G, WU B B. Ultimate load capacity of FRP-strengthened RC beams considering different failure modes and secondary loading effects [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(1): 180-188. (in Chinese)
- [54] ZAWAM M, SOUDKI K, WEST J S. Factors affecting the time-dependent behaviour of GFRP prestressed concrete beams [J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 24: 100715.
- [55] 付一小, 叶见曙, 熊文, 等. CFRP 布混合粘贴加固 RC 梁斜截面抗剪性能研究[J]. *公路交通科技*, 2018, 14(1): 64-71.
- FU Y X, YE J S, XIONG W, et al. Study on shear performance of RC beam oblique section strengthened with hybrid bonding CFRP sheets [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2018, 14(1): 64-71. (in Chinese)
- [56] 刘兴喜, 徐荣桥. FRP 加固混凝土梁粘胶层剪应力分析[J]. *工程力学*, 2019, 36(Sup1): 149-153.
- LIU X X, XU R Q. Interfacial shear stress in FRP-strengthened RC beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(Sup1): 149-153. (in Chinese)
- [57] 高磊, 张峰. HB-FRP 加固混凝土结构组合界面黏结特性[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(6): 969-976.
- GAO L, ZHANG F. Composite interfacial bonding characteristics of HB-FRP to concrete structures [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(6): 969-976. (in Chinese)
- [58] 高磊, 张峰, 刘佳琪, 等. HB-FRP 布加固混凝土对其界面粘胶性能的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(9): 51-59.
- GAO L, ZHANG F, LIU J Q, et al. Characterization of interfacial bonding for HB-FRP strengthened concrete beams [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(9): 51-59. (in Chinese)
- [59] 高磊, 张峰, 叶见曙, 等. 侧向约束下 FRP 加固混凝土界面黏胶性能[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2018, 48(6): 996-1003.
- GAO L, ZHANG F, YE J S, et al. Effects of lateral constraint on the behaviour of FRP-to-concrete bond [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2018, 48(6): 996-1003. (in Chinese)
- [60] 罗威, 何栋尔, 肖云逸, 等. 考虑应变率效应的 FRP-混凝土界面正拉黏胶性能研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2018, 31(3): 89-93.
- LUO W, HE D E, XIAO Y Y, et al. Experimental analysis on interfacial tensile bonding performance between FRP and concrete concerning strain rate effect [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2018, 31(3): 89-93. (in Chinese)
- [61] 刘钰中. 外贴 FRP 加固梁中胶层应力的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- LIU Y Z. Stress analysis of adhesive layer in FRP strengthened beams [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [62] 胡波, 姜宇恬. 纤维增强复材-钢界面有效黏结长度模型对比研究[J]. *工业建筑*, 2019, 49(3): 29-35.
- HU B, JIANG Y T. Comparative research on effective bond length models for FRP-to-steel interfaces [J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(3): 29-35. (in Chinese)
- [63] 汤显廷. 斜向 U 型箍限制 FRP 受弯加固钢筋混凝土梁中部剥离的试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- TANG X T. Suppression of IC debonding in FRP-plated RC beams using inclined FRP U-jacketing: An experimental study [J]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [64] 李晓琴, 陈前均, 陈建飞, 等. 中低速荷载下 FRP 与混凝土界面本构模型开发[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(2): 219-222.
- LI X Q, CHEN Q J, CHEN J F, et al. Constitutive model development of FRP-to-concrete interface under middle/low loading rates [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2019, 51(2): 219-222. (in Chinese)
- [65] 钱聪. 纤维增强复合材料加固混凝土梁的时变性能设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- QIAN C. Research on the design method considering time-dependent behavior of concrete beam strengthened by fiber reinforced polymer [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [66] SHI J W, CAO W H, WU Z S. Effect of adhesive properties on the bond behaviour of externally bonded FRP-to-concrete joints [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 177: 107365.
- [67] ZHOU Y W, WANG X W, SUI L L, et al. Effect of mechanical fastening pressure on the bond behaviors of hybrid-bonded FRP to concrete interface [J]. *Composite Structures*, 2018, 204: 731-744.
- [68] 陈雨唐, 缪凡璠, 唐晨, 等. 冻融循环与持续荷载共同作用下 FRP 片材-混凝土界面黏胶性能的退化行为

- [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 468-476.
- CHEN Y T, MIAO F F TANG C, et al. Bond performance degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interface under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 468-476. (in Chinese)
- [69] 刘生纬. 硫酸盐环境下 CFRP-混凝土界面粘结性能退化规律及劣化机理研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- LIU S W. Research on degradation law and mechanism of CFRP sheet-concrete interfacial bonding performance under sulfate environment [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2018. (in Chinese)
- [70] 李东洋. 湿热环境下 CFRP 加固 RC 梁疲劳主裂纹扩展规律研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- LI D Y. Study on fatigue main crack propagation behavior of RC beams strengthened with CFRP under hot-wet environments [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [71] 罗姗姗. 温度-海水环境下 CFRP 加固 RC 梁疲劳性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- LUO S S. Study on fatigue performance of reinforced concrete (RC) beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in hot-seawater environment [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [72] 李恒. 表层嵌贴预应力 CFRP 板条加固钢筋混凝土梁抗弯静力和疲劳性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- LI H. The Static and fatigue load behavior of reinforced concrete beams strengthened with NSM prestressed CFRP strips [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology. (in Chinese)
- [73] ASCIONE F, LAMBERTI M, NAPOLI A, et al. Modeling SRP-concrete interfacial bond behavior and strength [J]. Engineering Structures, 2019, 187: 220-230.
- [74] YANG Y Q, FAHMY M F M, CUI J, et al. Nonlinear behavior analysis of flexural strengthening of RC beams with NSM FRP laminates [J]. Structures, 2019, 20: 374-384.
- [75] 姜浩, 张天鹏, 田龙强. FRP 加固损伤钢筋混凝土梁研究综述[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(9): 64-66.
- JIANG H, ZHANG T P, TIAN L Q. Review of FRP reinforced damaged RC beams [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(9): 64-66. (in Chinese)
- [76] 邢丽丽, 孔祥清. 外贴 FRP 加固钢筋混凝土梁结构性能研究进展[J]. 混凝土, 2018(9): 40-44.
- XING L L, KONG X Q. Research progress on structural performance of RC beams strengthened with externally bonded FRP sheets [J]. Concrete, 2018(9): 40-44. (in Chinese)
- [77] 蔡涛, 江世永, 姚未来, 等. 纤维增强复合材料加固钢筋混凝土梁徐变的研究进展[J]. 合成纤维, 2018, 47(5): 35-41.
- CAI T, JIANG S Y, YAO W, et al. Research on long-term creep of RC beams strengthened with externally bonded FRP plates [J]. Synthetic Fiber in China, 2018, 47(5): 35-41. (in Chinese)
- [78] 卢亦焱. 纤维增强复合材料与钢材复合加固混凝土结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 138-146.
- LU Y Y. Research advances in hybrid strengthening of concrete structures with FRP and steel [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 138-146. (in Chinese)
- [79] NASER M Z, HAWILEH R A, ABDALLA J A. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures A critical review [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109542.
- [80] 范向前, 刘决丁, 胡少伟, 等. FRP 加固混凝土研究现状与展望[J]. 混凝土, 2019(12): 156-160.
- FAN X Q, LIU J D, HU S W, et al. General introduction of the research for FRP reinforced concrete [J]. Concrete, 2019(12): 156-160. (in Chinese)
- [81] 张森. 混凝土-石材粘结界面抗剪性能试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- ZHANG M. Experimental research on the shear property of interfacial bonding of concrete and stone [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [82] 毛德均, 钱永久. 套箍法加固 RC 偏压柱承载力计算方法研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(3): 454-464.
- MAO D J, QIAN Y J. Research on calculation methods of bearing capacity of RC eccentrically compressed column strengthened by reinforced concrete jacketing [J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering, 2019, 39(3): 454-464. (in Chinese)
- [83] LIU C, HUANG Y H, LU Y C. Experimental study on the performance of the UHPC longitudinal joint

- between existing bridge decks and lateral extensions [J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(6): 1871-1882.
- [84] SAKR M A, EL-KHORIBY S R, KHALIFA T M, et al. Modeling of RC shear walls strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPC) jackets [J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109696.
- [85] ZHOU C D, A. S H, QIU Y K, et al. Experimental investigation of axial compressive behavior of large-scale circular concrete columns confined by prestressed CFRP strips [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(8): 04019070.
- [86] JANWAEN W, BARROS J A O, COSTA I. A new strengthening technique for increasing the load carrying capacity of rectangular reinforced concrete columns subjected to axial compressive loading [J]. *Composites Part B-engineering*, 2019, 158: 67-81.
- [87] 李柔含, 李宏男, 李超. 考虑动力损伤退化的钢筋混凝土柱恢复力模型[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(8): 100-109.
- LI R H, LI H N, LI C. Hysteretic model for reinforced concrete columns considering effects of dynamic damage and deterioration [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(8): 100-109. (in Chinese)
- [88] 王震, 王景全, 修洪亮, 等. 矩形空心墩等效塑性铰模型[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(1): 76-86.
- WANG Z, WANG J Q, XIU H L, et al. Equivalent plastic hinge model of rectangular hollow piers [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(1): 76-86. (in Chinese)
- [89] 邴鹏. 考虑加载循环次数的弯剪破坏 RC 圆柱抗震性能研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2018.
- BING P. Study on seismic performance of flexural-shear failure RC circular column considering number of loading cycles [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [90] 张艳青, 贡金鑫, 韩石. 钢筋混凝土杆件恢复力模型综述(I)[J]. *建筑结构*, 2017, 47(9): 65-70.
- ZHANG Y Q, GONG J X, HAN S. Reviews of restoring force model for reinforced concrete members (I) [J]. *Building Structure*, 2017, 47(9): 65-70. (in Chinese)
- [91] 黎璟, 邵长江, 钱永久, 等. RC 矩形空心墩的新型滞回模型及参数识别方法[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(4): 765-773.
- LI J, SHAO C J, QIAN Y J, et al. Innovative hysteresis model and parameter identification method for reinforced concrete rectangular hollow piers [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(4): 765-773. (in Chinese)
- [92] 劳晓杰, 韩小雷, 季静, 等. CFRP 约束损伤钢筋混凝土的轴压性能[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(7): 1-9.
- LAO X J, HAN X L, JI J, et al. Axial compression behavior of CFRP-confined damaged reinforced concrete [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(7): 1-9. (in Chinese)
- [93] 曹玉贵. 不同加载路径下 FRP 约束混凝土柱的轴向应力-应变关系分析及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- CAO Y G. Analysis and application of stress-strain relationship of FRP confined concrete columns under different loading [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [94] 张艳青. 钢筋混凝土墩柱弹塑性性能及在桥梁抗震设计中的应用研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2017.
- ZHANG Y Q. Study on elastoplastic properties of reinforced concrete pier column and their applications in seismic design of bridges [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [95] 邵长江, 韦旺, 漆启明, 等. 混凝土墩柱塑性铰区箍筋设计用量试验研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(12): 114-123.
- SHAO C J, WEI W, QI Q M, et al. Experimental study on design quantity of stirrup plastic hinge region of concrete column [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(12): 114-123. (in Chinese)

(编辑 章润红)