

锈蚀钢筋砼承载力退化和抗力时变可靠度研究综述

蒋琛^{1,2}

(1.长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410004; 2.湖南广播电视大学, 湖南 长沙 410004)

摘要: 综述了锈蚀钢筋砼结构承载力退化和抗力退化的研究现状, 结果表明钢筋锈蚀是导致承载力退化的主要因素, 如何准确评估锈蚀钢筋砼抗弯承载力是确保结构安全的关键因素; 现有抗力退化分析主要采用概率分析方法, 多以随机过程来模拟, 如何收集更多的有用数据, 采用更为精确的模型和计算方法使计算结果与实际情况更为接近是今后的研究方向。

关键词: 桥梁; 钢筋砼; 锈蚀; 承载力; 抗力; 随机过程

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)02-0157-04

锈蚀会导致服役 RC 桥梁的抗弯性能下降, 大气环境的锈蚀和砼性能的劣化等因素均会使 RC 受弯构件承载能力提早退化, 失效模式也会发生较大变化。目前, 受时间、空间等条件的制约, 自然环境的锈蚀砼构件暴露试验相对较少, 锈后 RC 梁的力学特性研究主要依据实验室的快速锈蚀方法得到的构件来展开。砼结构的时变特性主要反映在结构抗力这个综合变量中, 而影响该变量的时变因素很多, 砼结构时变可靠度研究可为确保结构服役期的安全提供重要参考依据。下面从承载力和抗力退化两方面对锈蚀钢筋砼的研究状况进行综述。

1 锈蚀钢筋砼结构抗弯承载力

国内外学者对既有构件的整体受力特性和失效模式进行了研究。文献[1]对锈蚀 RC 梁的性能退化给出了解释, 其中损伤构件通过不同大小电流的作用得到。文献[2]根据现行相关规范计算理论得到了锈蚀 RC 梁的计算方法, 该方法对以往试验结论进行了总结。文献[3]通过对已锈蚀 RC 构件进行分析, 研究了实际构件的力学退化原理。

文献[4]考虑钢筋横断面损失所带来的 RC 梁抗弯承载能力降低, 研究了梁—拱共同存在对抗剪承载力的影响, 计算分析了无腹筋锈蚀 RC 梁的抗剪承载力、抗弯承载能力和相对应的失效情况; 通过对实际案例的计算, 得出一旦构件表面出现可观察到的损伤, 两界面之间的整体作用就会发生变化, 这时构件的失效形式可能从受弯破坏向受剪破坏转变, 其承载能力会显著下降; 另外, 锚固区的粘结强

度降低也会导致梁发生粘结锚固破坏。文献[5]对锈蚀 1 年多的 8 根加速锈蚀构件进行加载试验, 试验过程中保持荷载恒定, 研究发现弯曲裂缝会对纵向锈胀裂缝的发展起到非常显著的作用。文献[6]利用随机概率分析理论, 提出了可变荷载情况下锈蚀 RC 构件的节点曲率随锈蚀程度的变化规律, 并对试件的挠度变化进行了长期观测。

文献[7]对自然条件和外加电流快速锈蚀情况下的锈蚀钢筋及锈蚀 RC 试件的试验情况进行了比较分析。易伟建等将固有频率分析方法应用于既有 RC 构件检测, 基于裂缝宽度和高度, 得出了锈损构件平均截面刚度的退化情况, 明确了挠度和频率间的联系。何世钦等通过测量长期持荷下既有构件的挠度变化, 对不同试验数据和方法进行了对比分析, 得到了试验梁的整体受弯性能随时间的变化关系。文献[8]针对目前大部分学者在进行锈蚀 RC 试件抗弯承载性能分析时仅考虑锈蚀因素的作用效应, 而对构件自身参数条件造成的 RC 梁抗弯承载力变化基本没有考虑的情况进行分析, 认为这方面的忽略可能造成研究锈蚀钢筋与砼的整体协同工作性能变化时产生不同结果。文献[9]给出了锈蚀后无粘结 RC 试件的力筋强度使用情况, 并对锈蚀后 RC 构件的抗弯能力退化原因进行了分析。

文献[10]根据国外已发表的发生锈蚀的 111 根 RC 构件, 结合试验结果, 考虑钢筋直径和锈蚀电流密度等多种因素情况, 得到了锈蚀 RC 梁弯矩理论公式。文献[11]对不同锈蚀情况下钢筋—砼界面间的粘结滑移关系进行了研究, 相关试验数据主要通

过拔出试验和有限元模拟得到,并对数据进行了对比分析。

文献[12]、[13]通过对试件保护层不浇筑砼的方法来模拟构件发生整体剥落的现象,并对该构件的整体力学性能进行了研究。文献[14]对快速锈蚀情况下的构件进行拉拔破坏试验,根据试验结果,考虑多种因素对钢筋锈蚀率和钢筋与砼间粘结性能的影响,得到了两者之间的关系表达式。也有研究通过对3种不同快速锈蚀情况下获取的构件进行整体性能试验,分析了锈蚀程度、不同自然条件和铁锈体积膨胀等因素对钢筋与砼间粘结性能的影响,结果表明当砼的裂缝宽度未超过 1 mm 时,铁锈的产生不会对钢筋与砼界面间的摩擦力造成太大影响。

2 砼结构抗力退化时变可靠度

目前,既有结构时变可靠性的研究主要侧重于模型选取、更新个别变量,服役桥梁实测数据的类型较少,在结构隐蔽部位检测数据的获取仍有待进一步研究。针对抗力退化的时变可靠度国外学者展开了大量研究。文献[16]通过中心抽样方法得到了腐蚀裂缝宽度和氯离子浓度分布的统计数据,对氯离子侵蚀影响下砼结构的时变可靠度进行了分析,根据蒙特卡罗模拟得到了结构失效的概率分布。文献[17]利用可靠度理论和贝叶斯网络对既有损伤砼结构的失效概率进行评估,给出了锈蚀钢筋砼结构随机预测模型的通用模板。

文献[18]给出了侵蚀环境下钢筋砼结构全寿命可靠性优化分析方法,并利用该方法对锈蚀钢筋砼结构的全寿命进行了评估。文献[19]利用模式识别和可靠性分析方法评估了既有结构的使用性能,该方法能分析试验和数值模拟中存在的误差,通过贝叶斯算法分析数据统计的不确定性。文献[20]分析了随机模型中各参数空间变异性对砼结构失效概率的影响,使用一种合理的随机场离散化方法对结构时变可靠度进行了蒙特卡罗模拟。文献[21]得到了多种桥梁评估方法和未来荷载等级之间的结构时变可靠度关系,给出了可靠度等级评定示意图和各因素之间的相互关系。文献[22]利用损伤力学、非线性分析、数值模拟和可靠性方法研究了氯离子扩散影响下砼结构疲劳破坏的时变可靠度,分析了砼疲劳损伤模型的原理,利用重要抽样法对氯离子扩散影响下砼结构疲劳破坏的时变可靠性进行了评估。

文献[23]提出了一种分析钢筋砼腐蚀初始和扩

展的可靠性分析模型,该模型可用来确定腐蚀起始时间和结构失效时间的概率分布。文献[24]建立了腐蚀钢筋砼各阶段即腐蚀萌生、裂纹萌生和传播的时变可靠度模型。文献[25]给出了正常使用状态下桥梁抗力退化的可靠度概率分析方法,利用该方法对一座已使用60年的既有钢筋砼桥梁的承载力进行了评估,并对其剩余使用寿命进行了预测。文献[26]提出了一种考虑物理退化、钢筋锈蚀、砼开裂的钢筋砼退化模型,该模型综合考虑了参数和模型的不确定性、负荷的概率特性、材料特性和氯离子扩散等因素的影响。文献[27]通过对4种多目标优化指标优缺点的比较,给出了损伤砼结构成本效率的最优解方案。文献[28]考虑服役、环境条件和体系改变对强度或刚度退化的影响,提出了一种钢筋砼结构时变可靠度评估方法。

文献[29]认为预测既有桥梁的可靠性就是建立合理的抗力预测模型和荷载效应预测模型,采用截尾方法和贝叶斯方法得到了合理的预测抗力,基于监测数据,利用贝叶斯动态模型实现了结构荷载效应实时预测。文献[30]利用三弯矩法得到了氯离子侵蚀下锈蚀钢筋砼的时变可靠度模型,认为在锈蚀导致的抗力退化概率分析方面,三弯矩法比传统蒙特卡罗法更简单、有效。文献[31]基于一阶和二阶可靠性理论,得到了两种简化的半解析概率模型,用来模拟表面氯离子浓度、氯阈值、氯化渗透深度和扩散系数等关键参数的不确定性。文献[32]利用菲克扩散定律模拟氯离子渗透过程,考虑了时变效应对氯离子扩散概率模型的影响,使用蒙特卡罗模拟和一阶可靠性分析方法对各因素耦合作用下结构的失效概率进行了计算。

文献[33]通过试验改进了氯离子扩散模型,进而建立了钢筋锈蚀模型。文献[34]统计分析了钢筋局部锈蚀下锈蚀因子的概率特征。文献[35]通过划分单元,考虑锈坑出现位置的随机性,假定各单元材料参数独立,综合已有钢筋截面积和钢筋强度退化模型,对受弯构件的弯曲和剪切抗力进行了预测。文献[36]结合已有模型,分析了用两种极限状态表示的时变过程,讨论了锈蚀初始和梁失效概率变化之间的相关性,提出了锈蚀RC梁时变可靠性评估方法,指出梁的失效概率对强度退化方式和锈蚀初始时间较为敏感。文献[37]将随机变量转化为等效的模糊变量,得到了结构抗力和荷载参数。文献[38]提出了一种评估RC桥梁老化损伤的多层模糊

分析方法。

3 结语

目前,对受弯构件承载力的研究各学者考虑的因素稍有不同,多是在实验室快速锈蚀实验基础上提出的半理论半经验公式,还难以达成共识而形成统一的计算理论,所取得的研究成果和实际应用还有一定差距。随着对桥梁结构服役期时变性能问题认识的不断深入,结构性能退化规律研究需结合实际情况,信息更新和融合的思想越来越受到重视。

参考文献:

- [1] 金伟良,夏晋,蒋遨宇,等.锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算模型[J].土木工程学报,2009,42(11).
- [2] 牛荻涛,翟彬,王林科.锈蚀钢筋混凝土梁的承载力分析[J].建筑结构,1999(8).
- [3] 袁迎曙,贾福萍.锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J].土木工程学报,2001,34(3).
- [4] Wang X-H, Gao X-H, Li B, et al. Effect of bond and corrosion within partial length on shear behaviour and load capacity of RC beam[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4).
- [5] El Maaddawy T, Soudki K, Topper T. Analytical model to predict nonlinear flexural behavior of corroded reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(4).
- [6] Choi Y S, Yi S-T, Kim M Y, et al. Effect of corrosion method of the reinforcing bar on bond characteristics in reinforced concrete specimens [J]. Construction and Building Materials, 2014, 54.
- [7] 张伟平.混凝土结构的钢筋锈蚀损伤预测及其耐久性评估[D].上海:同济大学,1999.
- [8] 孙彬,牛荻涛,王庆霖.锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J].土木工程学报,2008,41(11).
- [9] Bhargava K, Ghosh A, Mori Y, et al. Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete; analytical and empirical models [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(11).
- [10] Mangat P, Elgarf M. Bond characteristics of corroding reinforcement in concrete beams [J]. Materials and structures, 1999, 32(2).
- [11] Fang C, Lundgren K, Chen L, et al. Corrosion influence on bond in reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11).
- [12] Kheder G F, Al Kafaji J M, Dhiab M. Flexural strength and cracking behavior of hybrid strength concrete beams [J]. Materials and structures, 2010, 43(8).
- [13] Val D V, Chernin L. Serviceability reliability of reinforced concrete beams with corroded reinforcement [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(8).
- [14] Du Y, Clark L A, Chan A H. Impact of reinforcement corrosion on ductile behavior of reinforced concrete beams [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(3).
- [15] 张社荣,王超,孙博.退化结构时变可靠性分析的随机过程新模型[J].四川大学学报:工程科学版,2013,45(2).
- [16] Mitsuyoshi Akiyama, Dan M Frangopol, Ikumasa Yoshida. Time-dependent reliability analysis of existing RC structures in a marine environment using hazard associated with airborne chlorides [J]. Engineering Structures, 2010, 32.
- [17] J Hackl, J Kohler. Reliability assessment of deteriorating reinforced concrete structures by representing the coupled effect of corrosion initiation and progression by Bayesian networks [J]. Structural Safety, 2016, 62.
- [18] Fabio Biondini, Dan M Frangopol. Lifetime reliability-based optimization of reinforced concrete cross-sections under corrosion [J]. Structural Safety, 2009, 31.
- [19] José C Matos, Paulo J S Cruz, Isabel B Valente, et al. An innovative framework for probabilistic-based structural assessment with an application to existing reinforced concrete structures [J]. Engineering Structures, 2016, 111.
- [20] B Sudret. Probabilistic models for the extent of damage in degrading reinforced concrete structures [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93.
- [21] Ferhat Akgul, Dan M Frangopol. Time-dependent interaction between load rating and reliability of deteriorating bridges [J]. Engineering Structures, 2004, 26.
- [22] Tianyu Xiang, Renda Zhao. Reliability evaluation of chloride diffusion in fatigue damaged concrete [J]. Engineering Structures, 2007, 29.
- [23] Jinane El Hassan, Philippe Bressolette, Alaa Chateauf, et al. Reliability-based assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress [J]. Engineering Structures, 2010, 32.
- [24] K G Papakonstantinou, M Shinozuka. Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structures of large dimensions considering crack effects [J]. Engineering Structures, 2013, 57.
- [25] Martina Šomodíková, David Lehky, Jirí Dolezel, et al. Modeling of degradation processes in concrete; probabilistic lifetime and load-bearing capacity assessment of existing reinforced concrete bridges [J]. Engineering

- Structures, 2016, 119.
- [26] Emilio Bastidas-Arteaga, Mauricio Snchez-Silva, Alaa Chateauneuf, et al. Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete structures[J]. Structural Safety, 2008, 30.
- [27] Giorgio Barone, Dan M Frangopol. Life-cycle maintenance of deteriorating structures by multi-objective optimization involving reliability, risk, availability, hazard and cost[J]. Structural Safety, 2014, 48.
- [28] Quanwang Li, Cao Wang, Bruce R Ellingwood. Time-dependent reliability of aging structures in the presence of non-stationary loads and degradation [J]. Structural Safety, 2015, 52.
- [29] Liu Yuefei, Lu Dagang, Fan Xueping. Reliability updating and prediction of bridge structures based on proof loads and monitored data[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66.
- [30] Xiaogang Zhang, Wei-ping Zhang, Xiang-lin Gu, et al. Time-dependent probability assessment for chloride induced corrosion of RC structures using the third-moment method[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38.
- [31] Bassem Saassouh, Zoubir Lounis. Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first- and second-order reliability methods [J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34.
- [32] Caio Gorla Nogueira, Edson Denner Leonel. Probabilistic models applied to safety assessment of reinforced concrete structures subjected to chloride ingress[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 31.
- [33] Vu K A T, Stewart M G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models[J]. Structural Safety, 2000, 22(4).
- [34] Stewart M G, Al-Harthy A. Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: experimental data and probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(3).
- [35] Stewart M G, Suo Q. Extent of spatially variable corrosion damage as an indicator of strength and time-dependent reliability of RC beams [J]. Engineering Structures, 2009, 31(1).
- [36] Bhargava K, Mori Y, Ghosh A. Time-dependent reliability of corrosion-affected RC beams (Part 1): estimation of time-dependent strengths and associated variability[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(5).
- [37] Marano G C, Quaranta G, Mezzina M. Fuzzy time-dependent reliability analysis of RC beams subject to pitting corrosion[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(9).
- [38] Liang M-T, Wu J-H, Liang C-H. Multiple layer fuzzy evaluation for existing reinforced concrete bridges[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2001, 7(4).
- [39] Zhang R, Mahadevan S. Reliability-based reassessment of corrosion fatigue life[J]. Structural Safety, 2001, 23(1).

收稿日期: 2016-10-09

(上接第 156 页)

定位焊接, 保证在下弦节点焊接时腹杆在长度方向上有自由伸缩的空间, 减少焊接收缩对桁高的影响。

5 结语

杆件实际制作与节段连续匹配拼装时对关键点进行测量, 结果显示上述增加预拱度修正弦杆长度的方法、连续匹配拼装胎架线形的设计方法和拼装线形的控制方法合理, 所积累的经验 and 数据可为类似项目的拼装制造提供参考。

参考文献:

- [1] TB 10002.2-2005, 铁路桥梁钢结构设计规范[S].
- [2] 万明坤. 钢桁梁起拱方法的探讨[J]. 长沙铁道学院学报, 1981(1).
- [3] 曾永平, 陈天地, 袁明, 等. 大跨度铁路钢桁梁斜拉桥预

- 拱度设置[J]. 铁道工程学报, 2010, 32(4).
- [4] 李绍龄. 三角形钢桁梁的预拱方法[J]. 铁道标准设计, 1995(9).
- [5] 陈绍游. 大跨度钢箱梁的制作与分段吊装技术研究与应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [6] 洗尚钧. 钢箱梁连续梁桥制造线形关键技术研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 28(13).
- [7] 吕建峰. 整体节点钢桁梁桥设计、制作细节问题及有关标准的探讨[J]. 钢结构, 2013(3).
- [8] 杨汉桥. 东新赣江特大桥钢桁梁整体节点制造工艺[J]. 桥梁建设, 2010(4).
- [9] 蔡禄荣. 大跨度钢桁梁拱桥预拱度设置及拼装误差理论论研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [10] 黄鑫, 罗章智, 成宇海. 重庆朝天门长江大桥主桁试拼装精度控制方法研究[J]. 世界桥梁, 2009(2).

收稿日期: 2016-11-14