

钢筋混凝土锈蚀损伤研究综述*

余璠璟, 曹大富, 李琮琦

(扬州大学 建筑科学与工程学院, 江苏扬州 225009)

摘要: 钢筋锈蚀是钢筋混凝土结构耐久性降低的主要因素之一。简要说明研究钢筋混凝土锈蚀损伤的重要意义, 阐述了钢筋混凝土锈蚀件损伤的研究状况。主要从混凝土中锈蚀钢筋的力学性能、钢筋锈蚀引起的混凝土损伤、锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能和锈蚀钢筋混凝土受弯构件、受压构件的受力性能、锈蚀钢筋混凝土构件抗震性能等方面总结归纳了国内外的研究现状与成果, 并分析了今后的研究方向。

关键词: 钢筋混凝土; 锈蚀; 损伤; 力学性能; 承载力

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006 - 7329 (2007) 01 - 0122 - 04

Review of Research on Damage of Corroded Reinforced Concrete

YU Fan - jing, CAO Da - fu, LI Zong - qi

(College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, P. R. China)

Abstract: The research result shows that the corrosion of reinforcement is one of the dominating factor for decreasing the durability of reinforced concrete structures. In this paper, the significance of the research of corroded reinforced concrete is presented, and an attempt is made to integrate the latest development with regard to the mechanical behaviors of reinforcement corrosion, the damage of concrete due to corroded bars, bond relationship between corroded bars and concrete, as well as the load capacity of corroded reinforced concrete flexural member and compressive member and the seismic behavior of corroded reinforced concrete element. And the trend of its development in future is discussed as well.

Keywords: reinforced concrete; corrosion; damage; mechanical behaviors; load capacity

钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的最主要因素。据报导美国 1998 年度总金属腐蚀造成的损失为 2 757 亿美元^[1], 现有桥梁因锈蚀破坏造成近 45% 的桥梁承载力不足, 必须修复与加固^[2]; 英国混凝土结构中有 36% 需重建或改建, 每年用于维修钢筋混凝土的费用高达 5.5 亿英镑^[1]; 其它如日本、澳大利亚等发达国家的混凝土结构中钢筋锈蚀也非常严重, 每年用于结构维修的费用以惊人的速度增长^[2]。我国工业与民用建筑中, 因钢筋锈蚀而引起的混凝土结构失效问题也很严重。如青岛一座大楼仅使用 3 年而因楼盖钢筋严重锈蚀导致结构失效, 16 层楼的楼盖全部拆除^[1]。山东改革开放以来兴建的一批高速公路桥, 投入使用约十年左右, 已发现钢筋严重锈蚀, 虽经维修加固, 2~3 年后仍出现腐蚀破坏, 有些桥梁需重建^[3]。钢筋锈蚀导致的后果严重, 造成的经济损失巨大, 因此, 研究钢筋混凝土锈蚀构件的损伤, 对在用结构的抗力评定、可靠性评价、准确预测结构的使用寿命都具有十分重要的实际意义。

混凝土中钢筋锈蚀会造成钢筋力学性能退化、混凝土截面性能损伤、钢筋与混凝土之间粘结力降低等后果, 导致混凝土构件的损伤, 改变构件破坏形态、降低构件承载能力, 从而直接影响结构的安全。

2 锈蚀钢筋的力学性能研究

钢筋锈蚀后其截面面积减小、力学性能产生相应的劣化, 钢筋的疲劳强度、极限延伸率、抗拉能力等都有明显降低, 预应力钢筋容易产生应力腐蚀。近年来国内外学者通过电化学锈蚀试验、工程拆除构件内锈蚀钢筋试验、有限元分析等多种方法对锈蚀钢筋的物理论学性能进行了研究^[4-8], 惠云玲等还对不同直径钢筋锈蚀前后的金相组织进行了分析^[7]。

张平生等^[4]人的研究认为: 钢筋锈蚀后, 其塑性随锈蚀程度的加大而降低, 而屈服强度的降低程度则与截面损失率成线性变化。Abdullah^[5]认为钢筋的均匀锈蚀不影响它的抗拉强度, 但在受力计算时应采用钢筋的实际面积, 锈蚀率大于 12% 时, 钢筋呈现脆性

* 收稿日期: 2006 - 08 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50478038)

作者简介: 余璠璟 (1966 -), 女, 江苏人, 讲师, 硕士, 主要从事混凝土结构耐久性研究。

破坏。袁迎曙^[6]认为平均锈蚀率小于 5%时可视为“均匀”锈蚀,而坑蚀会引起钢筋提前屈服。惠云玲^[7]和 Capozucca^[10]的研究认为:锈蚀率小于 1%的钢筋其力学性能指标基本和母材相同;锈蚀率小于 5%且均匀锈蚀的热扎钢筋,其应力应变曲线仍具有明显的屈服点,钢筋的伸长率基本大于规范允许的最小值,钢筋的屈服强度、抗拉强度仍可以与母材相同考虑,但在计算承载力时则应考虑截面的折减。当锈蚀率大于 5%后,坑蚀的应力集中现象逐渐表现出来,相应的名义屈服强度、极限强度、伸长率都明显下降^[7],混凝土中钢筋因锈蚀引起的力学性能下降以延伸率最为敏感^[8],文献[6]通过线性回归方式给出了锈蚀率大于 5%时锈蚀钢筋的伸长率、名义屈服强度、抗拉强度的计算公式。沈德建等^[11]人的研究认为海水浪溅环境比大气环境锈蚀对钢筋强度的影响要大,而且海水浪溅环境下钢筋以坑锈为主,研究认为随着锈蚀率的增大,锈蚀钢筋的应力应变关系发生较大变化,屈服平台渐渐变短直至消失,钢筋渐渐呈现脆性破坏形式,极限强度与屈服强度的比值越来越小。并建立了屈服强度、极限强度与锈蚀率的多项式关系。

3 钢筋锈胀力导致的混凝土的损伤

混凝土中的钢筋锈蚀以后,其锈蚀物的体积是相应钢筋体积的 2~4 倍,因而会向四周膨胀,而钢筋四周的混凝土则限制它的膨胀,从而产生了交界面上的作用力,这种作用力就称为钢筋锈胀力^[9]。金伟良等^[9]利用弹性力学理论分析了由钢筋均匀锈蚀导致的外围混凝土保护层胀裂时刻和胀裂以前的钢筋锈胀力计算公式,并分析了影响钢筋锈胀力的因素,研究认为钢筋锈蚀率是钢筋锈胀力最显著的影响因素。

钢筋锈胀力不仅会降低钢筋与混凝土的粘结性能,而且造成混凝土截面性能的损伤。Capozucca^[10]研究认为锈胀应力会使受压区混凝土处于双轴异号受力状态,混凝土沿锈蚀钢筋纵向胀裂,此时混凝土已完全进入塑性状态,混凝土出现受压软化现象,显著影响构件的延性性能。钢筋混凝土构件一旦受锈胀纵裂以后,钢筋锈蚀速度大大加快。王军强^[12]研究了钢筋锈蚀产物的膨胀在混凝土中产生的应力,为进一步作试验研究进行了准备。张喜德等^[12]进行了钢筋锈胀应力对混凝土抗压强度影响的试验研究,结论是:混凝土开裂前钢筋的锈蚀量很小,但锈蚀使抗压强度明显下降;混凝土锈胀开裂后,其抗压强度略有所回升。

4 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究

钢筋锈蚀后由于锈蚀产物改变了钢筋与混凝土之

间的接触面、铁锈体积膨胀使混凝土抗裂强度降低,从而使锈蚀钢筋与混凝土之间的粘结性能不断劣化,导致钢筋与混凝土不能充分协同工作,致使结构承载力下降。

早期的研究认为钢筋锈蚀增加了表面粗糙,因而对钢筋与混凝土的粘结性能是有利的^[14]。但随后的研究表明,在钢筋锈蚀的初始阶段,锈蚀率小于 1%左右时,钢筋与混凝土之间的粘结强度有所提高;随着锈蚀率的增加,粘结强度将有大幅度的下降^[14,15]。研究认为钢筋直径、钢筋锈蚀程度、混凝土保护层厚度等是影响锈蚀后钢筋与混凝土粘结强度的主要因素^[15]。X. Fu^[15]通过对光圆钢筋和变形钢筋的对比试验发现,当锈蚀裂缝刚出现时,光圆钢筋的粘结强度比无锈蚀情况下高;而变形钢筋的粘结强度则比无锈蚀情况下低。Amleh^[16]则由试验结果给出了不同锈蚀率与粘结强度的关系曲线以及不同裂缝宽度与粘结强度的关系曲线。

范颖芳等^[17]对长期受氯化物腐蚀的结构中替换下来的钢筋混凝土构件进行了试验研究,试验表明锈蚀后钢筋与混凝土之间的粘结力降低幅度达 20%~50%。王林科等^[18]也采用从工程中截取的锈蚀试件,对光面锈蚀钢筋进行了试验研究,结论是:光面钢筋锈蚀后混凝土未开裂时的粘结强度高于无锈钢筋的粘结强度,混凝土保护层产生锈胀开裂后,粘结强度随裂缝宽度增加而减小,锈胀裂缝宽度在 0.1 mm 左右时,粘结强度相当于无锈钢筋的粘结强度。还有些学者^[19,20]采用快速锈蚀试件进行了试验研究,研究结论和前述的研究结论基本一致。目前有些文献给出了锈蚀钢筋粘结强度计算公式,一般是在试验基础上给定一个粘结力降低系数,该系数体现了钢筋锈蚀对粘结力的影响。

为了进一步准确分析锈蚀钢筋混凝土构件承载力的变化,必须找出准确的钢筋、混凝土之间粘结-滑移本构关系。一些学者在这一方面也做了大量的研究工作。赵羽习^[20]从理论上分析了钢筋应力 σ_s 、钢筋与混凝土之间的粘结应力 τ 及相对滑移 s 的解析表达式,并结合钢筋拔出试验数据,给出了 $\tau-s$ 关系随不同位置的变化规律;张伟平^[21]等通过试验与理论分析给出的锈后不同胀裂宽度下的钢筋混凝土粘结滑移本构关系,考虑了 $\tau-s$ 关系沿锚长的变化。

但目前的研究成果都是基于各自的试验,成果并不统一。钢筋与混凝土之间的粘结性能受到多种因素的综合影响,且各影响因素与粘结力之间是非线性关系,目前还缺乏既适于计算又便于工程实际应用的计算模型。

5 锈蚀钢筋混凝土构件受力性能研究

锈蚀钢筋混凝土构件承载力的研究,对在用钢筋混凝土构件的抗力衰减模型及进行混凝土结构的寿命评估和预测有重要意义^[22]。钢筋锈蚀造成混凝土构件的承载力退化以致失效的原因表现为以下三个方面:一是由于钢筋锈蚀使钢筋截面面积减小,锈蚀钢筋的力学性能退化;二是钢筋锈蚀产生锈胀力,造成混凝土截面损伤;三是钢筋锈蚀会使钢筋与混凝土间的粘结性能退化。目前国内外的学者对锈蚀后的钢筋混凝土构件承载力性能进行了大量的试验研究。

试验研究较多的是锈蚀钢筋混凝土受弯构件的承载力问题。研究表明随着钢筋锈蚀率的增加,受弯构件的延性不断降低^[23,24],并能影响锈蚀梁的破坏形态。如浙江大学的不同锈蚀率下的混凝土梁试验发现随着梁中钢筋锈蚀量的增加,其破坏形态由适筋梁的形态转向少筋梁的形态,破坏时的裂缝由分散的几条转为集中的一条^[23];Rodriguez^[24]通过对不同配筋率、箍筋间距以及不同锈蚀率的钢筋混凝土梁的抗弯试验发现:钢筋锈蚀率小的梁一般为受弯破坏,而钢筋锈蚀率和箍筋间距较大时,往往会发生剪切破坏。钢筋混凝土梁的强度和刚度随着纵筋锈蚀程度的增加而不断下降。Mangat^[25]通过对 111 根低配筋梁进行的快速锈蚀试验,发现钢筋锈蚀后混凝土梁的弯曲能力和变形能力明显降低,钢筋直径损失 10% 时,弯曲承载力降为对比组的 25%。研究认为在钢筋锈蚀率小于 5% 时,平截面假定还成立,锈蚀梁的破坏形态与未锈梁抗弯强度仍可用现行规范计算^[26~28];当锈蚀率大于 5%~6% 时,则应考虑锈蚀引起钢筋与混凝土间粘结性能的退化,钢筋与混凝土间不能很好地协同工作。牛荻涛等^[29]基于现行计算理论,结合本单位及他人试验成果提出了较为实用的锈蚀梁的承载力计算模型,该模型考虑了钢筋截面的减小、屈服强度降低、粘结力下降三种影响因素。但吴瑾等人^[30]的研究认为在锈蚀开裂前,受压区钢筋锈蚀膨胀使混凝土处于拉压双向应力状态,混凝土抗压强度降低,承载力计算时应考虑这些影响;锈蚀裂缝开展较大时粘结力基本丧失,应用无粘结预应力钢筋的方法建立了锈蚀后受弯构件承载力计算方法^[30]。受弯构件的承载力问题研究比较充分,计算模型已比较成熟。

国内外对受压构件的试验研究不如受弯构件多,国内冶金建筑研究总院^[31]、西安建筑科技大学^[32,33]开展了一些试验研究,试验内容有轴压、大小偏心受压构件。试验结果表明:轴心受压锈蚀构件的破坏过程与完好构件没有明显差别,锈蚀构件的承载力比正常构

件相比降低较多;偏心受压构件的裂缝出现及开展、侧向挠度的变化、混凝土应变、破坏特征及破坏荷载与正常构件有所差异,承载能力随钢筋锈蚀率的增大而大幅降低。研究表明偏心受压构件的正截面应变分布与平截面假定有出入,受弯构件的强度削弱主要是由于钢筋截面的削弱引起,而受压构件则受混凝土截面损失和钢筋截面削弱的共同作用^[31~33]。在锈蚀钢筋混凝土受压构件的承载力计算方面,史庆轩等基于试验结果提出了一些定性的计算原则。

目前对锈蚀混凝土构件的抗剪性能的研究较少,由于箍筋的混凝土保护层薄且直径小,故箍筋更容易锈蚀且锈蚀程度更严重,因而对锈蚀钢筋混凝土构件的抗剪承载力的研究不容忽视。Rodriguez^[24]所作的试验中考虑了配箍率不同情况下箍筋锈蚀对构件破坏形态、承载力的影响,得出一定性结论:箍筋的坑蚀对构件的抗剪承载力有重要影响。田瑞华等^[33]进行了七个锈蚀钢筋混凝土试件的抗剪性能的试验研究,结果表明:在混凝土构件中箍筋的锈蚀程度比纵向钢筋严重,且箍筋的局部锈蚀腐蚀会影响梁的抗剪承载力,并且锈蚀越严重承载力降低越多。徐善华等^[35]通过 18 根锈蚀钢筋混凝土简支梁和 3 根无锈蚀的普通钢筋混凝土梁的斜截面抗剪性能试验研究,主要研究了不同剪跨比下箍筋锈蚀程度对抗剪性能的影响,其主要结论是:箍筋锈蚀削弱斜裂缝两侧的骨料咬合力;箍筋锈蚀对破坏形态影响较小;箍筋锈蚀对试件斜截面承载能力有较大影响^[35]。由于影响钢筋混凝土构件抗剪性能因素的复杂性,因此对锈蚀混凝土构件的抗剪性能还有很多的研究工作有待完成。

还有少数学者对锈蚀钢筋混凝土构件的抗震性能进行了研究,如日本作过受弯构件恢复力性能试验,西安建筑科技大学作过压弯构件恢复力性能试验研究^[36]。已有的试验结果表明:钢筋锈蚀对反复水平荷载作用下混凝土压弯构件的承载力、屈服强度、刚度、延性、滞回特性、耗能能力和延性影响较大,随钢筋锈蚀率的增加构件承载力、刚度、耗能能力和延性等逐渐降低^[36]。构件在反复荷载作用下动力性能的研究是重要的亟待研究的课题,据报载曾是四川十大标志性建筑之一的宜宾南门大桥悬索与桥面断裂处,即为吊桥的动载与静载结合处,断裂处露出的钢缆已是锈迹斑斑。现有的锈蚀钢筋混凝土构件的抗震性能研究成果距离实用还很遥远。

6 结论

随着人们对钢筋锈蚀问题研究的深入,取得的成果也越来越多,但由于锈蚀钢筋混凝土构件问题十分

复杂,现有的研究成果还很不完善,远不能满足实际工程的需要。目前锈蚀钢筋力学性能研究中所采用材料大多是在钢筋非应力的状态下进行的,而实际工程中钢筋都处于应力条件下,钢筋应力状态下遭受锈蚀其力学性能是否和非应力状态下的一致,还有待于进一步的研究,另外预应力钢筋锈蚀后的力学性能研究也应加强。为了能准确预测结构的剩余寿命,除了着力研究锈蚀钢筋混凝土构件的受压性能、抗剪性能及抗震性能外,还需要得到钢筋锈蚀后结构的承载力衰减模型,这也是耐久性问题的研究目标之一。

参考文献:

- [1] 柯伟. 中国腐蚀调查报告 [M] 北京:化学工业出版社、工业装备与信息工程出版社, 2003
- [2] Dimitri V. Val Mark G Stewart and Robert E Melchers Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges [J] Engineering struction, 1998, 20 (11): 1 010 - 1 019.
- [3] 冯乃谦,蔡军旺,牛全林. 山东沿海钢筋混凝土公路桥的劣化破坏及其对策的研究 [J] 混凝土, 2003 (1): 3 - 6
- [4] 张平生,卢梅. 锈蚀钢筋的力学性能 [J] 工业建筑, 1995, 25 (9): 41 - 44.
- [5] Abdullah A. Amusallam. Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars [J] Construction and Building Materials, 2001 (15): 361 - 368
- [6] 袁迎曙,贾福萍,蔡跃. 锈蚀钢筋的力学性能退化研究 [J] 工业建筑, 2000, 30 (1): 43 - 46
- [7] 惠云玲,林志伸,李荣. 锈蚀钢筋性能试验研究分析 [J] 工业建筑, 1997, 27 (6): 10 - 13.
- [8] 丁威,崔国惠. 大气条件混凝土中钢筋锈蚀程度发展对保护层开裂和钢筋力学性能影响的试验研究 [J] 混凝土, 2000 (1): 38 - 41.
- [9] 金伟良,赵羽习,鄢飞. 钢筋混凝土构件的均匀钢筋锈胀力及其影响因素 [J] 工业建筑, 2001, 31 (5): 6 - 8
- [10] Robert Capozucca Damage to reinforced concrete due to reinforcement corrosion [J] Construction and Building Materials 1995, 9 (5): 295 - 303
- [11] 沈德建,吴胜兴. 海水浪溅下混凝土中锈蚀钢筋性能试验研究及仿真分析 [J] 工业建筑, 2005, 35 (3): 58 - 62
- [12] 王军强. 钢筋锈蚀产物膨胀在混凝土中产生的应力分析 [J] 建筑技术开发, 2002, 29 (1): 7 - 10
- [13] 张喜德,韦树英,彭修宁. 钢筋锈蚀对混凝土抗压强度影响的试验研究 [J] 工业建筑, 2003, 33 (3): 5 - 7.
- [14] Al- Sulaimani G.J. etal Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members [J] ACI Structural Journal, 1990, 87 (2): 220 - 231.
- [15] X Fu and D. D. L. Chung Effect of Corrosion on the Bond Between Concrete and Steel Rebar [J] Cement and Concrete Research, 1997, 27 (12): 1 811 - 1 815.
- [16] Lanya Amleh and Saeed Mirza Corrosion Influence on Bond Between Steel and Concrete [J] ACI Structural Journal, 1999, 96 (3): 415 - 422
- [17] 范颖芳,黄振国,李健美,郭乐工. 受腐蚀钢筋混凝土构件中钢筋与混凝土粘结性能研究 [J] 工业建筑, 1999, 29 (8): 49 - 51.
- [18] 王林科,陶峰等. 锈后钢筋混凝土粘结锚固的试验研究 [J] 工业建筑, 1996, 26 (4): 14 - 16
- [19] 潘振华,牛荻涛,王庆霖. 锈蚀率与极限粘结强度关系的试验研究 [J] 工业建筑, 2000, 30 (5): 10 - 12
- [20] 赵羽习,金伟良. 钢筋与混凝土粘结构关系的试验研究 [J] 建筑结构学报, 2001, 23 (1): 32 - 37.
- [21] 张伟平,张誉. 锈胀开裂后钢筋混凝土粘结构关系研究 [J] 土木工程学报, 2001, 34 (5): 40 - 44.
- [22] 李宏毅,陈朝晖,白绍良等. 结构耐久性应用研究现状综述 [J] 重庆建筑大学学报, 2001, 23 (2): 98 - 103
- [23] 金伟良,赵羽习. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯强度的试验研究 [J] 工业建筑, 2001, 31 (5): 9 - 11.
- [24] Dr J. Rodriguez, L. M. Ortega and J. Casal Load carrying capacity of concrete structures with corroded reinforcement [J] Construction and Building Materials, 1997, 11 (4): 239 - 248.
- [25] P. S Mangat, M. Elgart Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement [J] ACI Structural Journal, 1999, 96 (1): 149 - 158
- [26] H. Abdul Razak, F. C. Choi The effect of corrosion on the natural frequency and modal damping of reinforced concrete beams [J] Engineering Structures, 2001 (23): 1126 - 1133.
- [27] 袁迎曙,余索. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化 [J] 建筑结构学报, 1997, 18 (4): 51 - 57.
- [28] 牛荻涛,翟彬等. 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力分析 [J] 建筑结构, 1999 (8): 23 - 25.
- [29] 牛荻涛,卢梅,王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土正截面受弯承载力计算方法研究 [J] 建筑结构, 2002, 32 (10): 14 - 17.
- [30] 吴瑾,吴胜兴. 锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力评估 [J] 河海大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (5): 283 - 286
- [31] 惠云玲,李荣等. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究 [J] 工业建筑, 1997, 27 (6): 14 - 17.
- [32] 史庆轩,李小键,牛荻涛. 钢筋锈蚀前后混凝土偏心受压构件承载力试验研究 [J] 西安建筑科技大学学报, 1999, 31 (3): 218 - 221.
- [33] 史庆轩,李小键,牛荻涛. 锈蚀钢筋混凝土偏心受压构件承载力试验研究 [J] 工业建筑, 2001, 31 (5): 14 - 17.
- [34] 田瑞华,颜桂云等. 锈蚀钢筋混凝土构件抗剪承载力的试验研究与理论分析 [J] 四川建筑科学研究, 2003, 29 (3): 36 - 38
- [35] 徐善华,牛荻涛. 锈蚀钢筋混凝土简支梁斜截面抗剪性能研究 [J] 建筑结构学报, 2004, 25 (5): 98 - 104.
- [36] 史庆轩,牛荻涛,颜桂云. 反复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力性能的试验研究 [J] 地震工程与工程振动, 2000, 20 (4): 44 - 50.