

Review of Bond Performance between Corroded Rebar and Concrete

Chencui Wang¹, Yanyan Zhang², Fulai Qu¹

¹School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Department of Architecture Engineering, Zhengzhou Chenggong University of Finance and Economics, Zhengzhou Henan

Email: yuzhif@foxmail.com, 55016198@qq.com, qfl@ncwu.edu.cn

Received: Aug. 15th, 2017; accepted: Aug. 30th, 2017; published: Sep. 11th, 2017

Abstract

The bond performance between corroded rebar and concrete is an important indicator to evaluate their ability working together. This paper analytically summarizes the different mechanisms of bond relationships of corroded rebar and concrete at initial and later stages of corrosion, introduces the main methods used currently for the research of bond performance between corroded rebar and concrete, analyzes the main influencing factors and their affecting regulations, and compares the calculation model of bond strength between corroded rebar and concrete. Given above, this paper proposes the relevant issues needed to be studied.

Keywords

Concrete, Corroded Rebar, Bond Performance, Deterioration, Test Method, Influencing Factor

锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究述评

王晨翠¹, 张燕燕², 曲福来¹

¹华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

²郑州成功财经学院建筑工程系, 河南 郑州

Email: yuzhif@foxmail.com, 55016198@qq.com, qfl@ncwu.edu.cn

收稿日期: 2017年8月15日; 录用日期: 2017年8月30日; 发布日期: 2017年9月11日

摘 要

锈蚀钢筋与混凝土的粘结性能是评价两者共同工作能力的重要指标。本文对锈蚀钢筋与混凝土的粘结性

能在锈蚀初期与后期的不同作用机理进行了分析总结, 归纳了当前锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的主要研究方法, 分析了锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的主要影响因素及其影响规律, 对比了锈蚀钢筋与混凝土粘结强度计算模型。在此基础上, 提出了尚需进一步深入研究的相关问题。

关键词

混凝土, 锈蚀钢筋, 粘结性能, 退化, 试验方法, 影响因素

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢筋混凝土结构因合理利用了钢筋的抗拉强度和混凝土的抗压强度, 成为土木工程结构的主要形式而得到广泛应用。钢筋与混凝土之间的可靠粘结是保证其在荷载作用下共同受力协调变形的的基本前提[1]。但是, 混凝土碳化和氯离子侵蚀等作用会致使混凝土结构中的钢筋锈蚀[2] [3]。随着锈蚀程度的不断增加, 钢筋与混凝土之间的粘结性能发生退化, 将最终导致结构的承载能力提前失效。美国标准局(NBS) 1975年调查显示, 美国全年因各种腐蚀造成的损失达 700 多亿美元, 其中混凝土中因钢筋锈蚀所造成的损失约占 40% [4]。《中国腐蚀调查报告》显示, 我国建筑部门每年的腐蚀损失约为 1000 亿人民币[5]。随着混凝土结构耐久性问题越来越受到重视, 各国学者对锈蚀钢筋与混凝土之间的粘结性能展开了研究。

2. 钢筋与混凝土粘结退化机理

钢筋与混凝土之间的粘结力主要有三部分组成: 化学胶着力、摩擦力、机械咬合力[6]。光圆钢筋的粘结强度主要取决于化学胶着力和摩擦力, 而变形钢筋的粘结强度主要依靠摩阻力和机械咬合力[7]。国内外的相关试验研究[8]-[13]表明, 在钢筋锈蚀初期, 由于锈蚀程度小、保护层尚未开裂, 钢筋产生的锈蚀物膨胀增强了混凝土对钢筋的约束力, 同时钢筋表面粗糙度增加, 因此粘结强度有所提高。随着锈蚀进一步发展, 钢筋表面产生的疏松的锈蚀层破坏了化学胶着力, 钢筋与混凝土间的摩擦力减小, 混凝土保护层锈胀开裂, 对钢筋的约束作用降低, 粘结强度开始降低。锈蚀钢筋对钢筋混凝土粘结性能的影响可用图 1 表示。

3. 锈蚀钢筋混凝土粘结性能研究方法

目前, 关于锈蚀钢筋混凝土粘结性能的研究一般采用试验方法和有限元分析方法。

3.1. 试验方法

3.1.1. 钢筋锈蚀方法

锈蚀钢筋混凝土试件的试验方法[14]-[17], 包括自然暴露试验、人工气候模拟、通电快速锈蚀、直接取用(或拆换)实际构件等方法。暴露试验法是在室外自然条件下使试件钢筋锈蚀, 该方法能够真实反映影响锈蚀的各种因素, 缺点是周期较长, 观测工作量较大。人工气候模拟法, 又称人工气候加速退化试验方法[18], 是通过模拟自然气候环境(日光、雨淋、温度、湿度、二氧化碳等)并同时加强某一种或几种控制因素的作用来加速试件退化的试验方法, 具有操作简便、环境模拟多样性、试验结果与自然锈蚀较接近等优点, 但不足之处在于设备费用高, 钢筋锈蚀量无法定量估算, 试验周期也较通电锈蚀法要长, 文

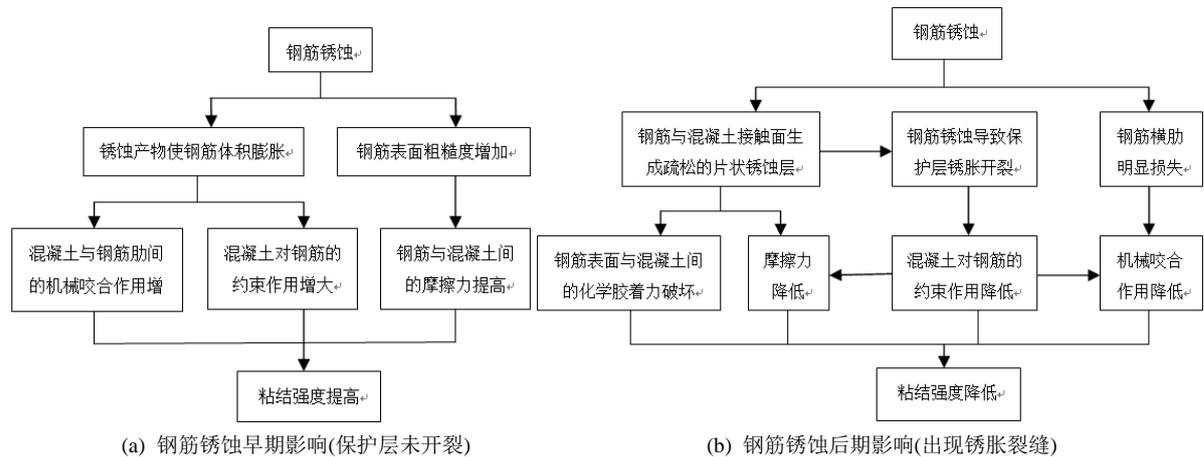


Figure 1. Effect of steel corrosion on bond behavior of steel-reinforced concrete

图 1. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土粘结性能的影响机理

献[8] [19] [20]均采用此法。直接取用(或拆换)实际构件法由于难度大, 成本高, 难以估测构件实际锈损程度及锈蚀因素, 因此在试验中较少选用, 文献[21] [22]采用了此法。通电锈蚀法是基于电解原理, 先将试件浸泡在一定浓度(3%~5%)的电解质(NaCl 或 CaCl_2)溶液中, 再把钢筋接在直流电源的正极, 浸泡在溶液中的不锈钢棒接在电源的负极, 电流密度不宜大于 3 mA/cm^2 [16], 通电形成电解池以达到快速锈蚀钢筋的目的。由于该法受混凝土密实度、浸泡溶液浓度及电流密度等因素的影响, 理论锈蚀量与实测值有一定偏差, 生成的锈蚀产物与自然锈蚀产物也有一定区别, 而为了在短期内在实验室获得类似于自然环境下的钢筋混凝土锈蚀试件, 通电加速锈蚀试验方法得到了学者们的广泛采用。

3.1.2. 粘结试验方法

常用的粘结试验按照目的分为两种类型: 一类是拔出或压出试验, 另一类是梁式或半梁式试验。前者通常用来对各种类型的钢筋粘结性能进行宏观比较。由于拉拔试验中的钢筋受拉, 周围混凝土受压, 并且没有考虑剪力和弯矩的作用, 因此与实际构件的受力状态不符。尽管如此, 因其试件制作及试验装置较简单, 试验结果便于分析, 特别是对钢筋外形特征的变化比较敏感, 被国内外学者广泛采用。而梁式或半梁式试验考虑了梁中钢筋锚固区存在的弯矩和剪力的影响, 模拟了剪跨区或纯弯区受拉钢筋的锚固状态, 因此与实际受力状态较为相符[6]。在一些试验中有学者[23] [24] [25] [26]将钢筋内贴应变片应用到以上两类粘结试验中, 通过贴应变片可以得到钢筋内部不同位置的钢筋应力, 并由此可推得钢筋与混凝土的粘结应力。

3.2. 有限元分析方法

有限元分析方法能够有效的分析锈蚀钢筋混凝土构件粘结性能退化的规律, 并弥补了试验周期较长、参数变化有限等方面的不足[27]。文献[28]指出目前应用有限元方法模拟钢筋锈蚀影响的方法分为两种, 一种是模拟钢筋锈蚀时的体积膨胀引起的内力, 另一种是模拟膨胀时的位移量, 并采用温度膨胀模型, 即施加给钢筋一定温度使其膨胀, 从而模拟锈蚀对构件粘结力及承载力的影响。文献[29]在已有锈蚀钢筋混凝土梁试验数据基础上, 采用 ANSYS 软件建立钢筋混凝土梁有限元模型, 以混凝土采用 Solid5 单元、钢筋采用 Link8 单元、钢筋与混凝土之间的粘结作用采用 Combine39 弹簧单元来模拟, 从而得到了粘结强度退化系数, 并提出了粘结强度退化修正公式。

4. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究

钢筋锈蚀后粘结性能的退化是关系到钢筋与混凝土两者之间能否保持原有共同作用的重要问题, 目

前的研究多集中在：锈蚀程度对粘结性能的影响、锈蚀钢筋与混凝土粘结力的计算等方面。

4.1. 影响粘结强度的因素

研究[8] [9] [23] [30] [31] [32] [33] [34]表明，影响锈蚀钢筋与混凝土之间粘结强度的主要因素是锈蚀率。除此之外，钢筋种类、保护层厚度、箍筋、混凝土强度等因素对粘结强度都有一定的影响。

4.1.1. 锈蚀率

混凝土中的钢筋一旦发生锈蚀，就会在钢筋表面生成一层疏松的锈蚀产物，其体积比原本未锈蚀的钢筋体积要大得多，因锈蚀产物最终形式不同而已，一般可达到原来体积的 2~4 倍。而在锈蚀率较小时，钢筋锈蚀产物的膨胀作用增大了混凝土对钢筋的约束力，钢筋与混凝土之间的摩擦系数因钢筋表面(尤其是光圆钢筋)锈蚀变得凸凹不平也略有增大，因此粘结强度随着锈蚀量的增大而增大，在锈胀开裂前，高于未锈钢筋[6] [21] [22] [23] [34] [35] [36]。文献[34]研究得到：对于拔出构件，锈蚀率小于 1%时对粘结有益，之后随着锈蚀率的增加粘结强度降低；对于梁式构件，锈蚀率小于 0.5%时粘结强度增大，之后缓慢下降，但在锈蚀率不大于 5%时，仍高于钢筋未锈时的粘结强度。而文献[37]则通过梁式试验发现，对于轻微锈蚀($\eta < 3\%$)的钢筋其粘结强度较未锈蚀钢筋略微增加，但幅度有限；当锈蚀程度进一步增加($3\% \leq \eta < 4\%$)，粘结强度增长迅速；当锈蚀率增大到一定程度后($\eta \geq 4\%$)，钢筋与混凝土之间的粘结强度呈下降趋势。试验结果[9]表明，光圆钢筋无箍筋试件在轻微腐蚀情况下，最大粘结强度可为未锈蚀时的 2.5 倍。文献[30]研究表明，对锈蚀量小于 6%的试件达到滑移粘结强度后，仍具有一段较明显的劈裂段，而锈蚀量大于 6%的试件由于钢筋变形肋受到严重锈蚀，达到滑移粘结强度后无明显的劈裂段。文献[38]试验发现，当试件达到极限粘结强度，锈蚀率对钢筋加载、自由端的相对滑移有着较大的影响，例如平均锈蚀率为 3.46%的试件自由端平均滑移量比未锈蚀试件的减少了 35%，平均锈蚀率为 3.46%和 14.83%的试件最大加载值比未锈蚀试件组的分别减少了 17%和 50%。

4.1.2. 钢筋种类

由于光圆钢筋与变形钢筋锈蚀后粘结机理不同，在轻微锈蚀情况下，光圆钢筋与混凝土粘结强度有较大幅度的提高，而变形钢筋粘结强度增长的幅度明显低于光圆钢筋[9] [23] [39]。文献[40]通过试验对不同种类锈蚀钢筋进行微观分析发现：带肋钢筋锈坑大而深且呈局部分布，光圆钢筋锈坑小而浅且分布相对均匀，相同条件下的带肋钢筋要比光圆钢筋更易受腐蚀，如 HRB335 级钢筋平均锈蚀率约是 HPB235 级钢筋的 1.74 倍。钢筋直径的增大使极限荷载随着增大，而相同锈胀裂缝宽度对不同直径的钢筋所释放的能量不同，这就造成了不同钢筋直径的试件粘结性能存在一定差别，但程度不大[30]。

4.1.3. 保护层厚度

混凝土对钢筋的约束程度与混凝土保护层有直接的关系，混凝土约束程度越小，钢筋锈蚀引起的膨胀力就越容易使混凝土胀裂，从而使粘结性能退化[30]。文献[6]结合规范提出在任何情况下，混凝土最小保护层厚度不小于 15 mm，混凝土保护层厚度应不小于钢筋直径，应重视预应力钢筋锈蚀的危害性，先张法的保护层厚度不宜小于 20 mm。文献[13]研究了在微锈情况下，不同保护层厚度对极限粘结强度的影响，如针对钢筋位于底边角部的试件，保护层厚度为 50 mm 的试件比保护层厚度为 30 mm 的试件极限粘结强度提高了 13.3%。试验[6] [41]表明，保护层厚度与钢筋直径的比值 c/d 越大，保护层致裂锈蚀率越大，致裂时间就越长。

4.1.4. 箍筋

文献[8]指出有箍筋试件达到峰值后混凝土表面出现顺筋裂缝，较细，钢筋被缓慢拔出，试件不完全

裂开,而无箍筋试件达到极限粘结强度后会很快发生劈裂破坏,主要原因是箍筋能够约束混凝土横向变形,另外箍筋对纵筋的锈蚀具有一定程度的保护。在腐蚀率不大的情况下,光圆钢筋配箍筋的试件其粘结强度随锈蚀率增大有显著的提高,比起无配箍筋试件,其粘结强度随腐蚀率提高较明显,如腐蚀率为5.2%时,粘结强度是未锈蚀的5.04倍,变形钢筋无配箍试件随锈蚀率增大粘结强度迅速降低,如在锈蚀率为9.02%时粘结强度只有未锈蚀的34%,而在锈蚀率小于7.63%时,变形钢筋配箍筋试件粘结强度基本无变化[9]。文献[42]发现光圆钢筋配箍试件在锈蚀率超过5%时粘结强度仍能增加,而未配箍试件随着锈蚀率逐渐增加,粘结强度先增加而后快速下降,拐点锈蚀率在2%~4%范围内。

目前大部分的研究主要集中于纵向钢筋锈蚀和锈后混凝土构件承载力和粘结退化的问题,对箍筋锈蚀的研究较少,而在混凝土耐久性试验研究和现场检测中发现,混凝土构件中的钢筋锈蚀首先从箍筋开始,且锈蚀程度比纵向钢筋严重,尤其在纵向钢筋与箍筋交汇处,箍筋严重锈蚀甚至锈断[43]。文献[44]则研究了在箍筋腐蚀的影响下钢筋混凝土粘结性能的变化规律,发现箍筋锈蚀率约为5%的时候达到最大粘结应力(7.73 MPa),而箍筋锈蚀率为15.70%的试件最大粘结应力(4.84 MPa)小于无箍筋时的最大粘结应力(5.85 MPa)。

4.1.5. 混凝土强度

混凝土的水灰比越大,混凝土的强度越低,混凝土中毛细孔就越多,其密实度也就越差,混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率也就越小[40][45]。文献[46]试验得到混凝土试块受压强度分别为25.5 MPa、31.0 MPa、42.0 MPa时,其对应粘结强度分别为12.1 MPa、13.8 MPa、15.3 MPa,认为强度高的混凝土抗拉强度也较高,对钢筋的握裹力较强,因而增大了钢筋与混凝土之间的摩擦,极限粘结强度随着混凝土强度的增加而提高。文献[26]试验结果表明,在钢筋直径、保护层厚度、锈蚀率近似的情况下,混凝土强度越高,自由端开始滑移时所需的荷载就越大,如混凝土强度分别为84.1 MPa和56.9 MPa,开始滑移时所需的施加荷载分别为84.1 kN和56.9 kN。而文献[33]通过压出试验得出:混凝土强度越高,极限粘结强度的下降速度越小,但混凝土强度对锈蚀率与极限粘结强度的本构关系的影响不大。

4.2. 锈蚀后粘结强度

表1收集整理了我国一些学者关于锈蚀钢筋与混凝土的粘结试验基本概况。由表1可见,试验锈蚀试件多是依靠快速锈蚀获得,原因是快速锈蚀能够在较短时间内达到试验所需的锈蚀程度;粘结试验一般采用拔出试验方法,偏向于研究锈蚀后变形钢筋与混凝土的粘结性能,对光圆钢筋锈蚀后与混凝土粘结性能的研究较少。箍筋作为一个不可忽略的锈蚀钢筋与混凝土粘结性能影响因素,为了使研究更接近于实际工程配置箍筋的情况,多数选择在试验设计中加设箍筋。

目前,对锈蚀钢筋与混凝土粘结强度的计算,尚没有普遍适用的计算模型。表2汇总了一些学者通过试验提出的锈后钢筋混凝土粘结强度的计算公式。

由于表2所列各学者所提出的锈蚀后计算模型均是基于特定的试验条件,通过试验所得数据采用回归分析的方法建立的,这一过程使得适用范围具有很大的局限性,并不能完全揭示出钢筋锈蚀所引起粘结性能退化的机理。考虑到要提出一个全面、简洁、易用的模型具有很大的难度,因此,关于锈蚀后极限粘结性能方面的研究,建立一个涵盖因素广泛且易于应用的计算模型仍旧是研究锈蚀钢筋混凝土问题的关键,需要长期探究。

5. 结语

综上所述,关于锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的研究已经取得了不少的进展,也获得了一些规律性的成果。由于锈蚀钢筋与混凝土之间粘结机理较为复杂,影响锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的因素又较多,

Table 1. Testing of bond between corroded steel bar and concrete
表 1. 锈蚀钢筋与混凝土粘结试验概况

试验者	锈蚀试件来源	试验方法	钢筋类型	直径(mm)	粘结段长度(mm)	箍筋	w/c	保护层厚度(mm)	试件数量	来源
张誉等	快速锈蚀	半梁式	螺纹	16	160	有	0.55	25	6	[6]
徐港等	快速锈蚀	梁式	螺纹	20	200	有	0.45	25	6	[11]
何世钦等	快速锈蚀	梁式	螺纹	12	60	无	—	25	12	[12]
何化南等	快速锈蚀	梁式	螺纹	20	200	有	0.30	30/50	8	[13]
吴庆等	快速锈蚀	拔出	光圆/螺纹	14, 20	100	有	0.55	20/30	30	[8]
陈留国等	快速锈蚀	拔出	光圆/螺纹	20	80	有/无	0.44	25	40	[9]
赵羽习等	快速锈蚀	拔出	光圆/螺纹	12	150/80	无	0.55	44	34	[23]
袁迎曙等	快速锈蚀	拔出	螺纹	14, 18, 20	2.5d	有	0.50	25	24	[30]
梁岩等	快速锈蚀	拔出	螺纹	20	60	有	—	20	20	[38]
王磊等	快速锈蚀	拔出	光圆/螺纹	18, 20, 22	100/50	无	0.38	30	34	[39]
赵顺波等	快速锈蚀	拔出	光圆	8	50	无	五种	46	90	[47]
曲福来等	快速锈蚀	拔出	光圆/螺纹	16	60	有	0.47	25	24	[48]
范颖芳等	现场退化	拔出	螺纹	16	110~130	—	—	3	20	[21]
王林科等	现场退化	拔出	光圆	12	(14.1~16.20)d	—	—	10~30.5	27	[22]

注：表中“—”表示文献中未提及。

Table 2. The calculating formulas of bond strength between corroded steel bar and concrete
表 2. 锈后钢筋混凝土粘结强度计算公式

试验者	计算式	参数说明
张誉等	$\eta_b = 0.9495 \cdot e^{-1.093w}$	τ_u, τ_u^* : 锈蚀前后的极限粘结强度; η : 钢筋锈蚀率; c : 保护层厚度(mm); d : 钢筋直径(mm); η_b : 粘结强度的锈蚀钢筋影响系数; δ : 钢筋锈层厚度(mm); δ^* : 胀裂时刻钢筋锈层厚度(mm); w : 锈胀裂缝宽度; l_a : 钢筋与混凝土锚固长度; ρ_{sv} : 腐蚀后钢筋混凝土构件配箍率; f_t : 腐蚀后钢筋混凝土抗拉强度; K_1 : 钢筋种类修正系数, 光圆取 1, 螺纹取 1.343; K_2 : 钢筋位置修正系数, 角区取 1, 边中取 0.537; f_{cu} : 混凝土强度。
袁迎曙等	$\tau_u^* = (1.0 - K_u \eta) \tau_u$ $K_u = 10.544 - 1.586(c/d)$	
赵羽习等	光圆钢筋 $\eta_b = \begin{cases} 1 + 22\delta, & \delta \leq \delta^* \\ 1 - 15\delta + 37\delta^*, & \delta > \delta^* \end{cases}$ 螺纹钢筋 $\eta_b = \begin{cases} 1 + 7\delta, & \delta \leq 0.05 \\ 1.46 - 2.3\delta, & \delta > 0.05 \end{cases}$	
范颖芳等	$\tau_u^* = (0.82 + 0.9d/l_a) \cdot (2.7 + 0.8c/d + 20\rho_{sv} - 7.3\eta) f_t$	
王林科等	$\eta_b = e^{-2.1w} (0.13 + 0.5c/d)$	
牛荻涛等	$\tau_u^* = \begin{cases} \tau_u, & 0 \leq \eta \leq 0.6\% \\ \tau_u - a(\eta - 0.006), & 0.6\% \leq \eta \leq 1 \end{cases}$ $a = 100.183K_1K_2c^{-0.381}d^{0.413}f_{cu}^{-0.0346}$	

且各因素之间相互关联，采用研究缺少统一的标准和试验方法，目前关于锈蚀钢筋与混凝土之间粘结性能的研究仍存在一定局限性。因此，尚需开展进一步系统深入研究：

1) 对于光圆钢筋，存在使粘结强度先提高而后降低的锈蚀率“临界值”，但此临界值尚未取得共识。鉴于大量结构特别是较小配筋率的水工板类结构构件，出于经济性考虑仍使用光圆钢筋，仍有必要进一步研究锈蚀光圆钢筋与混凝土的粘结性能，并确定其关键特征值。

2) 变形钢筋和混凝土的粘结性能与光圆钢筋和混凝土的粘结性能存在明显差异。钢筋锈蚀后, 变形钢筋与光圆钢筋和混凝土的粘结性能退化机理也存在明显的差异。因此需要研究锈蚀变形钢筋和混凝土的粘结性能退化机理, 特别是变形钢筋的锈蚀后断面形态、力学性能变化规律, 研究变形肋在钢筋锈蚀过程中的变化及其对粘结性能的影响规律, 确定其关键特征值。

3) 钢筋锈蚀膨胀将使混凝土保护层承受径向压力, 并由此导致混凝土在环向拉应力超过混凝土抗拉强度时出现裂缝。因此, 混凝土表面开裂、裂缝宽度与钢筋锈蚀率之间存在必然的相关性。但由于影响因素复杂, 尚未取得一致性研究成果。对此开展进一步研究, 对于混凝土结构构件中钢筋锈蚀情况的检测评定具有重要工程价值。

4) 在拉拔试验、梁式试验等方法中, 钢筋的受力状态存在一定差别。锈蚀钢筋因其在试件中的受力状态差异, 造成的粘结性能试验结果差异, 尚缺乏研究论证。因此, 开展不同试验方法试验成果的对比研究, 对于锈蚀钢筋混凝土结构可靠性评价是十分重要的。

5) 对于已经研究证明的锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的影响因素, 如钢筋锈蚀率、箍筋、混凝土保护层厚度、混凝土强度等, 需要进一步研究各因素对粘接性能的关联性, 从而为进一步研究分析主要影响因素并针对性采取防护措施提供科学依据, 也为锈蚀钢筋和混凝土粘结性能可靠度分析提供数值计算依据。

基金项目

河南省高等学校重点科研项目(16A560037)。

参考文献 (References)

- [1] 赵顺波. 混凝土结构设计原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.
- [2] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] 贡金鑫, 赵国藩. 钢筋混凝土结构耐久性研究的进展 [J]. 工业建筑, 2000, 30(5): 2-5.
- [4] 罗福午. 建筑结构缺陷事故的分析及防止[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [5] 柯伟. 中国腐蚀调查报告[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 张誉, 蒋利学, 张伟平, 等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学出版社, 2003.
- [7] 徐有邻, 沈文都. 钢筋外形对粘结锚固性能的影响[J]. 工业建筑, 1987(3): 26-30.
- [8] 吴庆, 袁迎曙, 蒋建华, 等. 锈蚀钢筋与混凝土黏结机理试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(5): 685-691.
- [9] 陈留国, 方从启, 寇新建, 等. 受腐蚀钢筋混凝土的粘结性能[J]. 工业建筑, 2004, 34(5): 15-17.
- [10] 徐有邻, 沈文都, 汪洪. 钢筋混凝土粘结锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(3): 26-37.
- [11] 徐港, 卫军, 王青. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的梁式试验[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 449-557.
- [12] 何世钦, 贡金鑫. 钢筋混凝土梁中锈蚀钢筋粘结性能的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(12): 2167-2170.
- [13] 何化南, 杨嫚嫚, 贡金鑫. 不同保护层厚度下微锈蚀钢筋混凝土粘结性能梁式试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 25-30, 35.
- [14] 徐港, 王青. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究进展[J]. 混凝土, 2006(5): 13-16.
- [15] 干伟忠, 金伟良, 高明赞. 混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 41-47.
- [16] 仲伟秋, 贡金鑫. 钢筋电化学快速锈蚀试验控制方法[J]. 建筑技术开发, 2002, 29(4): 28-29, 67.
- [17] 徐港, 卫军, 张克强, 等. 钢筋混凝土结构加速锈蚀试验方法评述[C]//陈志鹏, 等. 土木工程结构试验与检测技术及结构试验课教学研讨会论文集: 2006年卷. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 135-139.
- [18] 耿欧, 袁迎曙, 李果. 钢筋混凝土耐久性人工气候加速退化试验的相关性研究[J]. 混凝土, 2004(1): 29-31.
- [19] 蒋连接, 马欢, 朱方之, 等. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能退化规律的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2012,

38(6): 70-72, 80.

- [20] 戴靠山, 袁迎曙, 杨广. 人工气候加速锈蚀后钢筋混凝土粘结性能试验研究[J]. 混凝土, 2004(11): 45-48.
- [21] 范颖芳, 黄镇国, 李健美, 等. 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.
- [22] 王林科, 陶峰, 王庆霖, 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.
- [23] 赵羽习, 金伟良. 钢筋与混凝土粘结本构关系的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 32-37.
- [24] 陈朝晖, 谭东阳, 曾宇, 等. 锈蚀钢筋混凝土粘结强度试验[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(1): 79-86.
- [25] 张伟平, 张誉. 锈胀开裂后钢筋混凝土粘结滑移本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 40-44.
- [26] 张永利. 锈蚀钢筋混凝土构件粘结性能及承载性能研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [27] 史波, 赵国藩. 锈蚀钢筋混凝土构件粘结性能的研究进展[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 653-659.
- [28] 张国学, 宋建夏, 刘晓航. 钢筋锈蚀对钢筋混凝土构件粘结力的影响[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 37-39.
- [29] 杨晓明, 孙国君, 陈永林, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁中钢筋与混凝土间粘结性能退化分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(4): 1388-1394.
- [30] 袁迎曙, 余索, 贾福萍. 锈蚀钢筋混凝土的粘结性能退化的试验研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(11): 47-50.
- [31] Lee, H.S., Noguchi, T. and Tomosawa, F. (2002) Evaluation of the Bond Properties between Concrete and Reinforcement as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion. *Cement and Concrete Research*, **32**, 1313-1318.
- [32] Kemp, E.L., Brezny, F.S. and Unterspan, J.A. (1968) Effect of Rust and Scale on the Bond Characteristics of Deformed Reinforcing Bars. *ACI Journal Proceedings*, **65**, 743-756.
- [33] 潘振华, 牛涛涛, 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): 9-12.
- [34] Al-Sulaimani, G.J., Kaleemullah, M., Basunbul, A., *et al.* (1990) Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members. *ACI Structural Journal*, **87**, 220-231.
- [35] Almusallam, A.A., Al-Gahtani, A.S., Aziz, A.R., *et al.* (1996) Effect of Reinforcement Corrosion on Bond Strength. *Construction and Building Materials*, **10**, 123-129.
- [36] Cabrera, J.G. (1996) Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion. *Cement & Concrete Composites*, **18**, 47-59.
- [37] 卫军, 张华, 徐港, 等. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(4): 28-31.
- [38] 梁岩, 罗小勇, 肖小琼, 等. 锈蚀钢筋混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(10): 95-100.
- [39] 王磊, 马亚飞, 张建仁, 等. 锈蚀钢筋粘结性能对比试验[J]. 公路交通科技, 2010, 27(6): 91-96.
- [40] 蒋建华, 袁迎曙, 李富民, 等. 混凝土中不同等级钢筋锈蚀行为的比较[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(5): 523-527.
- [41] 王倩, 徐海群. 钢筋在不同强度等级混凝土中锈蚀行为的分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(1): 106-108.
- [42] Fang, C.Q., Lundgren, K., Chen, L.G., *et al.* (2004) Corrosion Influence on Bond in Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Research*, **32**, 2159-2167.
- [43] 刘西拉. 重大土木与水利工程安全性及耐久性的基础研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 1-7.
- [44] Zhou, H.J., Lu, J.L., Xu, X., *et al.* (2015) Effects of Stirrup Corrosion on Bond-Slip Performance of Reinforcing Steel in Concrete: An Experimental Study. *Construction and Building Materials*, No. 93, 257-266.
- [45] 施惠生, 郭晓璐, 张贺. 水灰比对水工混凝土中钢筋锈蚀的影响[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1500-1505.
- [46] 宋力, 曲福来, 赵顺波. 锈蚀钢筋与混凝土黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2010(4): 74-75.
- [47] Zhao, S.B., Qu, F.L., Zhou, Y.H., *et al.* (2009) Experimental Study on Bond Strength between Corroded Steel Bars and Concrete. In: *Innovation & Sustainability of Structures*, South China University of Technology Press, 1171-1176.
- [48] 曲福来, 闫磊源, 刘桂荣, 等. 往复荷载下不均匀锈蚀钢筋与混凝土黏结性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(4): 110-113.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org