

箍筋约束锈蚀光圆钢筋与混凝土黏结性能试验研究

郑文奎^{1*}, 张迪¹, 董志彦¹, 曲福来^{1,2#}

¹华北水利水电大学, 河南 郑州

²河南省生态建材工程国际联合实验室, 河南 郑州

收稿日期: 2022年10月7日; 录用日期: 2022年10月27日; 发布日期: 2022年11月9日

摘要

钢筋与混凝土的黏结性能是衡量两者协同工作的重要指标。本文以锈蚀率和混凝土强度为影响因素, 制作了96个中心拉拔试件, 完成了箍筋约束下锈蚀光圆钢筋与混凝土拉拔试验。研究表明: 由于箍筋的约束作用, 光圆钢筋与混凝土的黏结滑移曲线的下降段较平缓。未锈蚀光圆钢筋与混凝土的黏结强度较小, 锈蚀率为1%~13%的光圆钢筋与混凝土黏结强度有明显提高, 锈蚀率大于13%的光圆钢筋与混凝土黏结强度出现下降趋势。锈蚀率相同时, 混凝土强度对光圆钢筋与混凝土黏结强度的影响不明显, 但对钢筋锈蚀速率有一定程度的影响, 随着混凝土强度的提高, 混凝土保护层胀裂所需的锈蚀时间延长。

关键词

锈蚀光圆钢筋, 混凝土, 箍筋约束, 黏结滑移曲线, 黏结强度

Experimental Research on Bond Performance between Corroded Plain Rebar and Concrete Confined with Stirrups

Wenkui Zheng^{1*}, Di Zhang¹, Zhiyan Dong¹, Fulai Qu^{1,2#}

¹North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²International Joint Research Lab for Eco-Building Materials and Engineering of Henan, Zhengzhou Henan

Received: Oct. 7th, 2022; accepted: Oct. 27th, 2022; published: Nov. 9th, 2022

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 郑文奎, 张迪, 董志彦, 曲福来. 箍筋约束锈蚀光圆钢筋与混凝土黏结性能试验研究[J]. 土木工程, 2022, 11(11): 1161-1169. DOI: 10.12677/hjce.2022.1111129

Abstract

Bond performance between rebar and concrete is a very important index to evaluate their collaborative workability. Considering the influencing factors of corrosion ratio and concrete strength, this paper finished the pull-out tests of 96 specimens to investigate the bond performance between corroded plain rebar and concrete confined with stirrups. The results indicate that the descending part of bond-slip curves reduced gently due to the confinement of stirrups, bond strength was relatively lower between un-corroded plain rebar and concrete. An obvious and increased bond strength was given out when the corrosion ratio was 1%~13%, and a decreased trend was appeared on the bond strength when the corrosion ratio was over 13%. With similar corrosion ratio, concrete strength had no substantial influence on bond strength, while it had the influence on corrosion speed in certain degree. With the increase of concrete strength, the corrosion time was prolonged to lead the spalling of concrete cover.

Keywords

Corroded Plain Bar, Concrete, Stirrup Confinement, Bond-Slip Curve, Bond Strengths

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

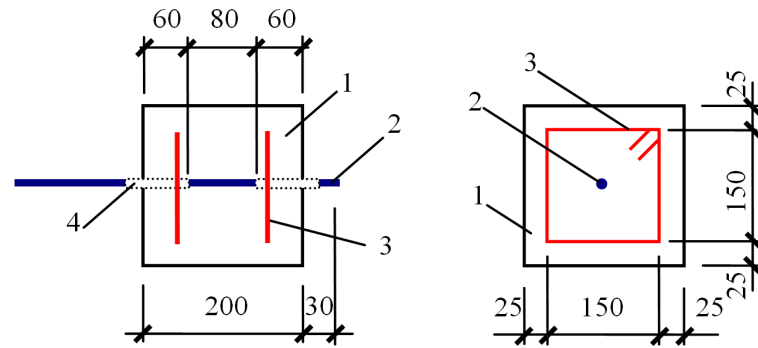
钢筋与混凝土的黏结性能是两者共同工作的基础[1] [2], 钢筋一旦发生锈蚀会影响黏结性能, 最终导致黏结强度退化, 影响构件或结构的耐久性和承载力[3] [4]。目前使用的钢筋从表面形态可分为变形钢筋和光圆钢筋, 变形钢筋与混凝土的黏结力由化学胶着力、摩擦力和机械咬合力组成, 而光圆钢筋与混凝土的黏结力只包括前两部分, 黏结机理与带肋钢筋有着本质差别[3] [4]。已有试验研究表明[5]-[14], 在钢筋发生锈蚀初期, 由于锈蚀产物体积膨胀, 增加了钢筋表面的粗糙度和混凝土对钢筋的约束力, 黏结强度有所增加。随着锈蚀进一步发展, 混凝土保护层会由于钢筋锈胀开裂, 从而降低对钢筋的约束力; 带肋钢筋还会产生横肋锈蚀, 降低机械咬合力。另外, 锈蚀钢筋与混凝土黏结强度也受横向箍筋约束的影响, 文献[13]发现无箍筋试件在达到极限黏结强度后会很快发生劈裂破坏, 黏结应力陡降; 而配有箍筋的试件在达到峰值荷载后混凝土表面出现较细的顺筋裂缝, 试件并不完全裂开, 钢筋被缓慢拔出。文献[14]发现未配箍筋试件随着锈蚀率逐渐增加, 钢筋与混凝土的黏结强度先增加而后快速下降, 拐点锈蚀率在 2%~4% 范围内, 而配箍试件在锈蚀率超过 5% 时黏结强度仍能增加, 黏结强度的拐点锈蚀率仍需进一步研究。

本文考虑箍筋的约束作用, 开展锈蚀光圆钢筋与混凝土黏结性能试验, 研究不同混凝土强度、钢筋锈蚀率情况下的黏结性能变化规律, 为建立箍筋约束锈蚀光圆钢筋与混凝土黏结滑移本构关系提供基础数据。

2. 试验概况

2.1. 试件设计

本试验考虑 8 种混凝土强度等级(C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45 和 C50)和 4 种钢筋锈蚀率, 制作了 32 组共 96 个中心拉拔试件, 拉拔试件尺寸及配筋如图 1 所示。



(1-混凝土; 2-主筋; 3-箍筋; 4-PVC 套管)

Figure 1. Size and reinforcement of specimen

图 1. 黏结试件尺寸及配筋

拉拔试件混凝土尺寸为 200 mm × 200 mm × 200 mm，黏结段长度 $l = 80$ mm。为确保黏结段的长度以及消除加载端应力集中的影响，非黏结段钢筋使用 PVC 套管包裹，试件布置直径 6 mm 光圆箍筋两道，间距为 100 mm。

拉拔钢筋为直径 16 mm 的 HPB300 光圆钢筋，实测屈服强度值和极限强度值分别为 386 MPa 和 583 MPa。混凝土采用普通硅酸盐水泥，粗骨料采用粒径小于 20 mm 的石灰岩碎石，细骨料为天然河沙，水为自来水。试验采用的混凝土配合比见表 1。根据标准实验方法，测得混凝土的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度也列于表 1。

Table 1. Mix proportion of concrete and tested strengths

表 1. 混凝土配合比与实测强度

设计强度	混凝土配合比				水泥强度等级	混凝土实测强度(MPa)	
	水泥	水	砂	石子		立方体抗压	劈裂抗拉
C15	1	0.69	2.45	3.61	32.5	27.19	1.87
C20	1	0.60	2.16	3.10	32.5	48.05	2.76
C25	1	0.52	1.81	2.61	32.5	45.87	2.42
C30	1	0.46	1.52	2.28	32.5	39.95	2.09
C35	1	0.50	2.30	3.45	42.5	39.86	2.06
C40	1	0.44	1.88	3.20	42.5	48.77	3.05
C45	1	0.40	1.63	2.78	42.5	52.24	3.28
C50	1	0.34	1.34	2.27	42.5	68.98	3.57

2.2. 钢筋加速锈蚀方法

试件浇筑养护后放入 5%氯化钠溶液中，采用直流通电法进行加速锈蚀[12]，为了控制锈蚀产物与实际锈蚀产物接近，控制电流密度为 0.25 mA/cm²。采用法拉第电解定律计算钢筋锈蚀时间：

$$\Delta w = \frac{M \cdot I \cdot t}{2N \cdot e} \quad (1)$$

式中， Δw 为钢筋质量损失，g； M 为铁的摩尔质量，56 g/mol； I 为电流强度，A； t 为通电时间，s； N 为阿伏伽德罗常数， $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ； e 为电子电量， $1.06 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

由于箍筋的约束作用，黏结强度拐点会有所增大，故本次试验最大锈蚀率设定为 15%，按照法拉第

定律计算需要通电 75 d。

2.3. 拉拔试验及锈蚀率测定

将通电锈蚀完毕的试件表面擦拭干净，使用穿心千斤顶进行拉拔试验，试验设备如图 2。试验时，在加载端布置 1 个荷载传感器、自由端布置 1 个钢筋位移计和 2 个混凝土位移计，相应的荷载和位移通过静态应变测试系统自动采集。加载时控制速度缓慢加载，直至钢筋被缓慢拔出一定距离。

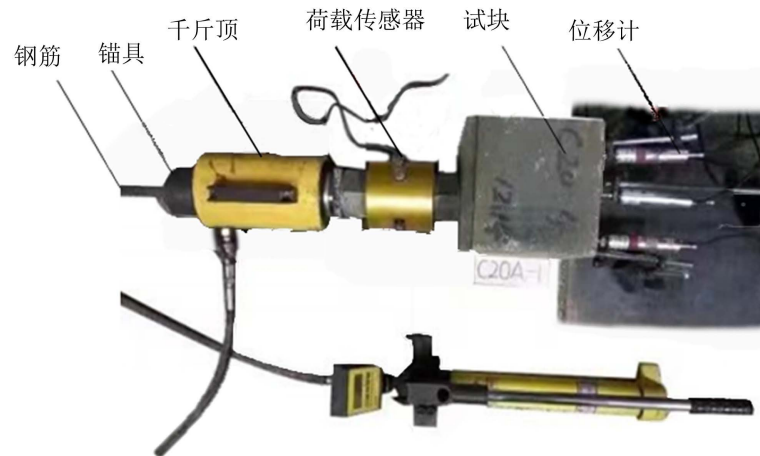


Figure 2. Test equipment
图 2. 试验设备

将试件进行破型，截取黏结段锈蚀钢筋测定锈蚀率，过程如下：轻轻刮掉钢筋表面粘附的水泥浆，用 15% 的稀盐酸进行酸洗，然后将其置于清水中漂洗洁净，并用碳酸钠溶液中和，再用清水漂洗，最后用干毛巾擦干后放置烘箱内将其烘干，时间不少于 4 h。在钢筋烘干后称其重量，并用精度为 0.02 mm 的游标卡尺逐个测量钢筋的长度。

钢筋实际锈蚀率采用下式计算：

$$\rho = \frac{m - m_1}{m} \times 100\% \quad (2)$$

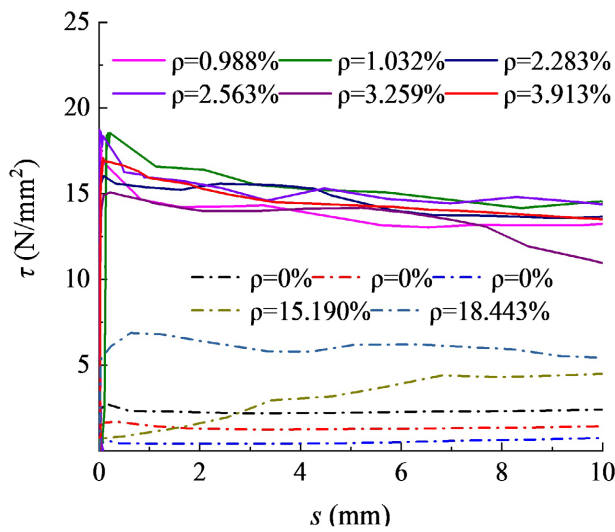
式中： m 为未锈钢筋单位长度的质量，本试验测得为 1.52 g/mm； m_1 为锈蚀钢筋单位长度质量。

3. 试验结果及分析

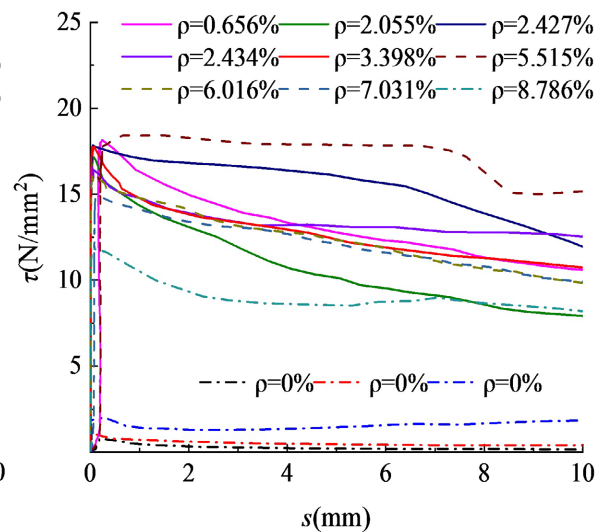
3.1. 黏结 - 滑移曲线

本次试验除少数试件出现钢筋被拉断，其余试件均发生钢筋滑移破坏。将同种强度的试件黏结 - 滑移(τ - s)曲线进行汇总，如图 3 所示。

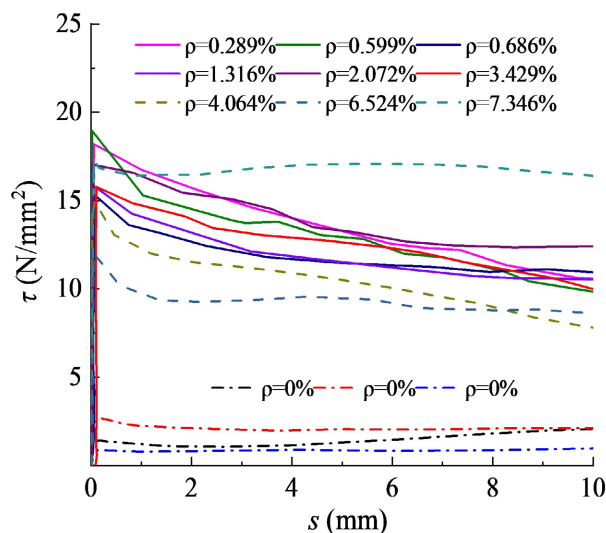
由图 3 可见，未锈钢筋的黏结强度相对较低，不同混凝土强度各组平均黏结强度值在 1.28~3.86 N/mm²，黏结应力在达到黏结强度后随滑移量增大下降幅度很小，个别试件出现了黏结应力先缓慢下降、后又增加的现象。由于光圆钢筋与混凝土的黏结力主要依靠化学胶着力和摩阻力，其值受到光圆钢筋表面光洁度的显著影响[6] [15]，因此，同组试件测得的黏结 - 滑移曲线出现了不同的变化规律，黏结强度也存在较大的差异。钢筋锈蚀后，总体上看黏结性能在钢筋锈蚀率为 13% 以内时均有较大程度的提高，大部分试件的黏结强度超过 15 N/mm²；由于箍筋的约束作用，钢筋伴随黏结界面的持续损伤、黏结应力的降低而发生较大的滑移，黏结滑移曲线有明显下降段，这与无箍筋约束试件下降段陡降有明显差别[6] [12]。



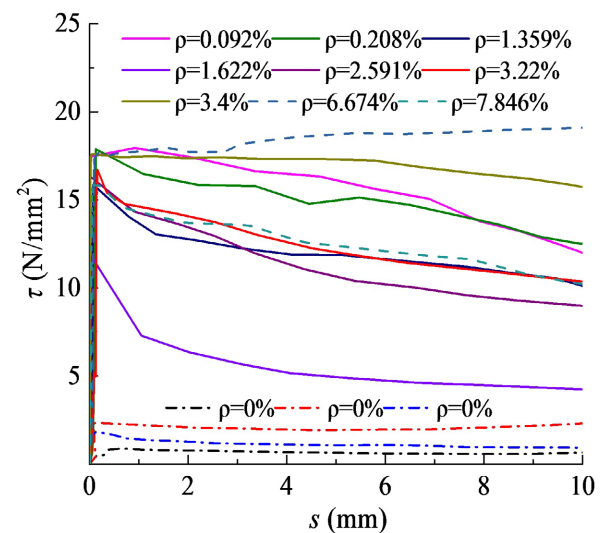
(a) C15



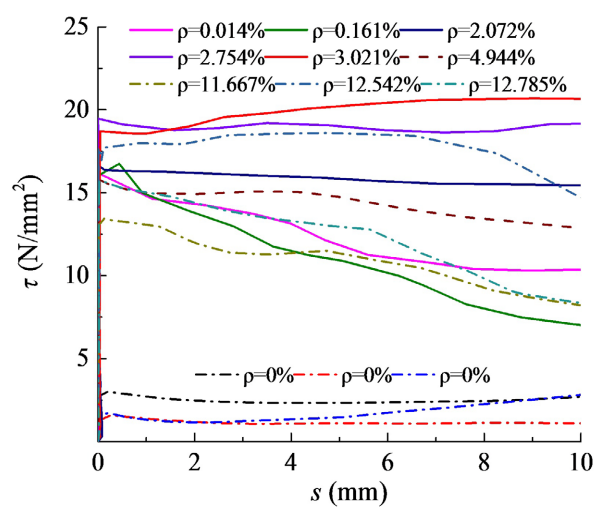
(b) C20



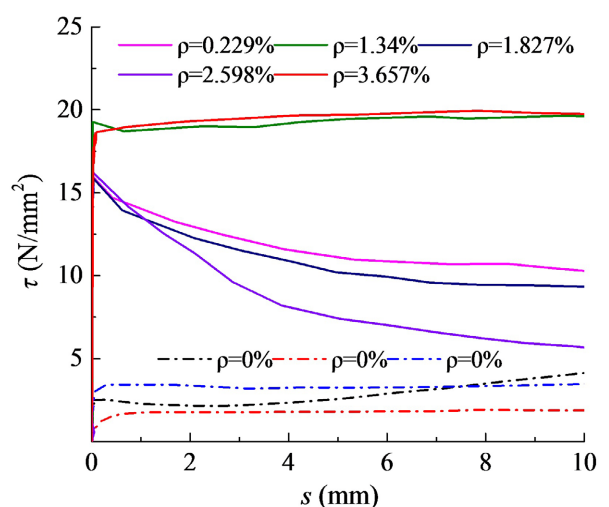
(c) C25



(d) C30



(e) C35



(f) C40

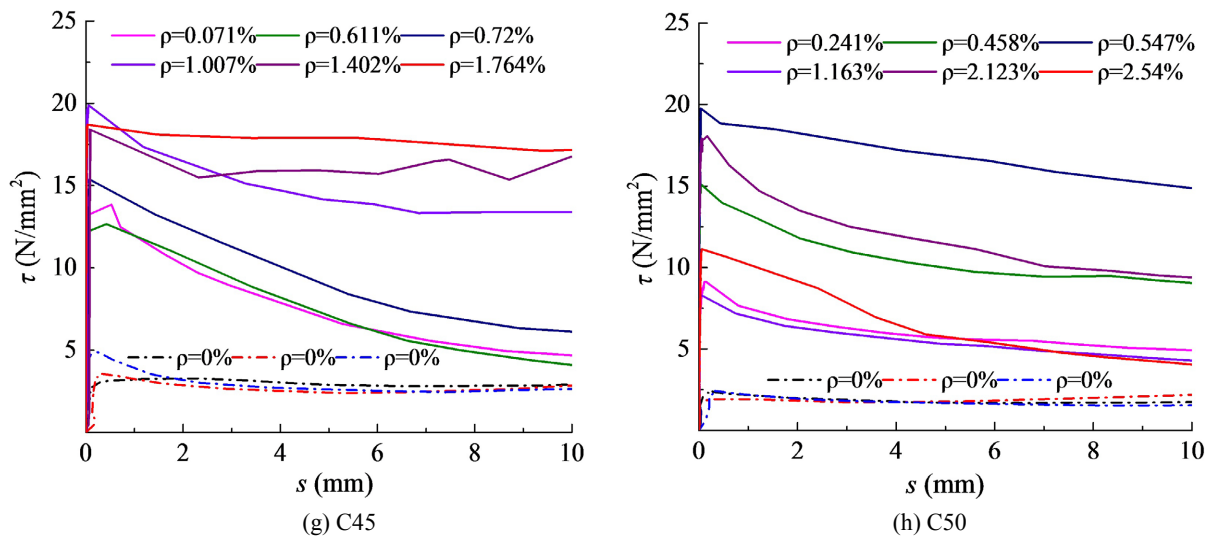


Figure 3. Bond-slip curves of specimens for different groups
图 3. 不同组试件的黏结 - 滑移曲线

图 4 给出了锈蚀光圆钢筋拉拔试件破型后的界面情况、锈蚀光圆钢筋黏结段在酸洗前后的表面状况。光圆钢筋表面锈蚀产物产生的体积膨胀作用受到箍筋的约束，在钢筋与混凝土的界面上形成了横向压应力，对界面摩阻力起到了提高效果。与此同时，钢筋表面的“蚀坑”使得界面材料性能发生改变，对界面摩阻力也产生一定影响。当混凝土强度较低，钢筋锈蚀率较大时(图 3(a))，锈蚀率超过 15%，混凝土产生顺钢筋方向的膨胀劈裂，削弱了锈蚀钢筋与混凝土界面的摩阻力，黏结强度相助降低。当混凝土强度较高，钢筋锈蚀率较大时(图 3(e))，锈蚀率超过 12%仍能保证混凝土的完整性，锈蚀钢筋与混凝土的黏结强度也保持了较高的水平。由于受到箍筋约束、钢筋锈蚀率、锈蚀钢筋表面形态、混凝土强度的综合影响，锈蚀光圆钢筋与混凝土的黏结 - 滑移曲线在达到极值黏结应力后的部分，表现出下降、水平、略有上升等不同形式。



(a) 试块破型后锈蚀情况



(b) 未酸洗的锈蚀钢筋

(c) 酸洗后的锈蚀钢筋

Figure 4. Status of corroded plain bars
图 4. 光圆钢筋锈蚀状况

3.2. 锈蚀率对黏结强度的影响

为了分析锈蚀率对黏结强度的影响,将所有试件的数据绘于图 5 中,其中纵坐标采用黏结强度与混凝土劈裂抗拉强度比值,以消除混凝土强度的影响[3] [5] [15] [16]。

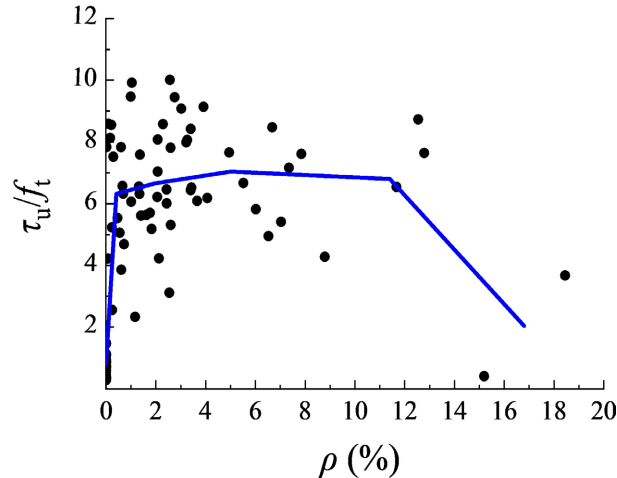


Figure 5. Effect of different corrosion ratios on bond strength
图 5. 不同锈蚀率对黏结强度的影响

分析图中的试验数据,当锈蚀率 $\rho=0\%$ 时,平均值 $\tau_u/f_t=0.819$,离散系数 $\delta=0.439$; $\rho<1\%$ 时, $\tau_u/f_t=6.323$, $\delta=0.323$; $\rho=1\%\sim 3\%$, $\tau_u/f_t=6.66$, $\delta=0.296$; $\rho=3\%\sim 8\%$, $\tau_u/f_t=7.039$, $\delta=0.172$; $\rho=8\%\sim 13\%$, $\tau_u/f_t=6.800$, $\delta=0.280$ 。由此可见,未锈蚀光圆钢筋与混凝土黏结强度低且存在较大的离散性,进一步说明了光圆钢筋与混凝土黏结性能受其表面形态显著影响的实质[16]。光圆钢筋与混凝土之间的黏结主要由化学胶着力和摩擦力组成,由于钢筋发生锈蚀在表面形成锈蚀层,化学胶着力可以忽略不计。钢筋锈蚀产物体积膨胀,收到箍筋的约束作用,钢筋与混凝土之间的挤压力增大,从而大大提高了光圆钢筋与混凝土之间的黏结强度。

通过研究也发现,随着钢筋锈蚀率的增加,光圆钢筋与混凝土的黏结强度快速增大,在锈蚀率 $\rho=3\%\sim 8\%$ 时达到最大值且离散性较小;之后随着锈蚀率进一步增大开始减小,当锈蚀率超过 13%时开始迅速降低。因此,在箍筋约束条件下,当钢筋锈蚀率在适当范围内时,锈蚀钢筋与混凝土黏结性能具有提高的效果。这与无箍筋试件黏结强度随锈蚀率先增加后下降,黏结强度转折点对应的锈蚀率约为 1.5%有着明显的不同[12]。

3.3. 混凝土强度的影响

将钢筋锈蚀率接近的试件归为一组,选取有代表性的几组试件进行比较,如图 6 所示。光圆钢筋未发生锈蚀时,黏结强度随混凝土强度的增加变化不大,均值在 2.1 N/mm^2 左右。当钢筋锈蚀率为 2%~4% 范围内,黏结强度随混凝土强度的变化不明显,与文献[17]的研究结果一致。由于光圆钢筋表面不带肋,黏结强度受混凝土强度影响很小,这与带肋钢筋的黏结强度有明显的区别。但从图 4 的黏结-滑移曲线峰值点后部分的曲线变化,仍能看出混凝土强度对锈蚀光圆钢筋黏结-滑移曲线有明显影响。当混凝土强度较低时(图 3(a)~(d)),锈蚀率 3% 左右的光圆钢筋黏结滑移曲线呈现随滑移量增大、黏结应力下降的变化关系;当混凝土强度较高时(图 3(e), 图 3(f)),锈蚀率 3% 左右的光圆钢筋黏结滑移曲线呈现随滑移量增大、黏结应力有所增大的变化趋势。这与本次试验钢筋锈蚀过程中发现随着混凝土强度等级提高,

由于混凝土水灰比减小增强了黏结界面致密性导致钢筋锈蚀速度减缓，且混凝土保护层产生胀裂可能性降低是一致的。

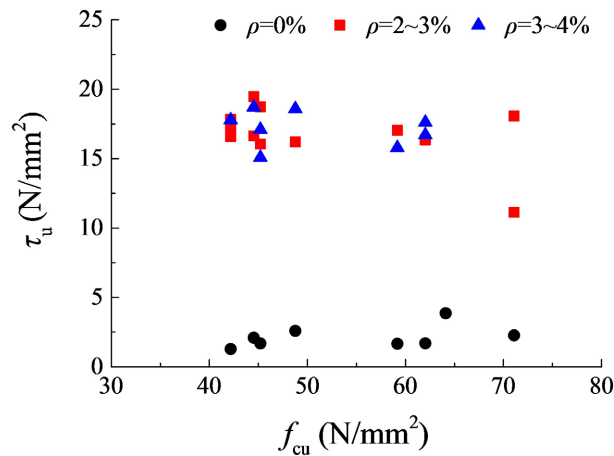


Figure 6. Effect of concrete strength on bond strength

图 6. 混凝土强度对黏结强度影响

4. 结论

1) 箍筋的约束作用改善了锈蚀光圆钢筋与混凝土的黏结滑移性能，除个别试件钢筋拉断外，其余试件均为光圆钢筋的拔出破坏。黏结 - 滑移曲线的峰值黏结应力后部分曲线段形状受钢筋锈蚀率、锈蚀钢筋表面形态等的影响，而呈现下降或平稳发展的不同特征。

2) 未锈蚀光圆钢筋与混凝土的黏结强度较小且数值离散性较大。发生一定程度锈蚀(本试验钢筋锈蚀率小于 13%)的光圆钢筋与混凝土的黏结强度明显提高。由于箍筋的约束作用，黏结强度拐点锈蚀率较无箍筋约束时增大。

3) 锈蚀率为 4%以内时，混凝土强度对黏结强度的影响不明显，但对黏结 - 滑移曲线的峰值黏结应力后部分曲线段形状具有明显影响。在同样锈蚀电流密度下，达到同样锈蚀率所需的锈蚀时间随着混凝土强度增大而延长。

参考文献

- [1] 史波, 赵国藩. 锈蚀钢筋混凝土构件黏结性能的研究进展[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(6): 653-659.
- [2] 刘桂荣, 张华岳, 王亚宇, 薛宇峰. 高温后反复荷载下钢筋与混凝土粘结性能试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 84-87.
- [3] 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. <https://doi.org/10.14359/2732>
- [4] 曲福来, 于永齐, 赵顺波, 等. 不均匀锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力试验研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 44-47.
- [5] 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.
- [6] 王晨翠, 张燕燕, 曲福来. 锈蚀钢筋与混凝土黏结性能研究述评[J]. 土木工程, 2017, 6(5): 476-483.
- [7] 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黏结性能研究[J]. 工业建筑, 1999, 29(8): 49-51.
- [8] 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.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00783-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00783-4)

- [9] 王朝阳, 杨鸥, 霍静思. 锈蚀钢筋与混凝土间粘结性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 150-155.
- [10] 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. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00077-1)
- [11] Cabrera, J.G. (1996) Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion. *Cement & Concrete Composites*, **18**, 47-59. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00043-7)
- [12] 宋力, 曲福来, 赵顺波. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能试验研究[J]. 混凝土, 2010(4): 74-75, 78.
- [13] 赵羽习, 金伟良. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能的试验研究[J]. 浙江大学学报, 2002, 36(4): 352-356.
- [14] 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. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.006>
- [15] GB50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] 赵顺波. 混凝土结构设计原理[M]. 第2版. 上海: 同济大学出版社, 2013.
- [17] 潘振华, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀率与极限黏结强度关系的试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(5): 9-12.