

文章编号: 1001-4888(2010)02-0151-08

锈胀开裂后变形钢筋与混凝土粘结性能实验研究^{*}

王磊, 马亚飞, 张建仁, 邓鸣

(长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 410004)

摘要: 为研究锈胀开裂对变形钢筋与混凝土间粘结性能的影响, 开展了电化学快速锈蚀内贴应变片钢筋混凝土试件的拔出实验, 得到了不同位置处钢筋的应变, 进而推导了钢筋与混凝土不同位置处的粘结应力, 分析了锈胀裂缝宽度对钢筋与混凝土间不同位置处粘结应力的影响。实验研究表明: 粘结试件中的钢筋应变对锈胀裂缝宽度的敏感性大; 对于锈胀裂缝较小的试件, 其粘结应力峰值接近加载端, 而对于锈胀裂缝较大的试件, 粘结应力峰值更靠近自由端。

关键词: 桥梁工程; 锈胀开裂; 钢筋应变; 粘结应力; 拔出实验

中图分类号: U447

文献标识码: A

0 引言

钢筋与混凝土之间的粘结是保证钢筋与混凝土两种材料能够共同工作的前提, 而钢筋锈蚀引起钢筋与混凝土间粘结力的退化, 影响桥梁结构的受力性能。因此, 考虑锈蚀钢筋与混凝土粘结性能直接关系到钢筋混凝土桥梁结构力学性能的评估。

钢筋与混凝土粘结性能的研究中, Almusallam 等^[1]给出了不同锈蚀程度、锈蚀裂缝宽度的钢筋与混凝土的粘结强度的关系。Lee 和 Noguchi 等^[2]用拔出实验并结合有限元分析的方法得出了钢筋锈蚀后与混凝土的粘结特性、最大粘结强度及刚度的关系。Mangat 和 Elgarf^[3]研究了锈蚀率在 0%~5% 范围内, 变形钢筋对粘结滑移和强度的影响, 结果表明: 锈蚀率在 0.4% 时粘结强度有所增大, 实验梁锈胀裂缝不超过 0.05mm, 锈蚀率大于 0.4% 时, 随锈蚀率增长粘结强度迅速下降, 实验梁产生的裂缝大于 0.2mm。Bhargava^[4]对大量锈后钢筋粘结实验的数据进行统计分析, 给出了基于拔出实验与梁式实验的锈后粘结力计算公式。Chung 等^[5]通过锈后钢筋的拔出实验得到了荷载大小—滑移曲线及锈蚀率对粘结应力的影响。袁迎曙等^[6]通过对锈蚀钢筋力学性能及与混凝土的粘结性能的实验研究, 建立了锈蚀钢筋与混凝土的粘结应力—滑移关系的退化模型。上述钢筋与混凝土的粘结应力—滑移关系中, 粘结应力为平均粘结应力, 滑移为试件端部(加载端或自由端)的滑移, 并不是真正意义上的 $\tau-s$ 本构关系。一些学者研究发现^[7], $\tau-s$ 曲线在不同位置是变化的。张伟平、张誉^[8]基于钢筋开槽、内贴应变片的半梁式粘结实验, 获得了不同试件锚固长度内粘结应力及钢筋与混凝土间相对滑移的分布规律, 建立了考虑锚固位置影响的锈后钢筋混凝土粘结滑移本构关系, 但其直接取相邻两截面的应力差作为粘结应力值的实测值, 由于实验测得的应变数据有限, 结果精度不高。赵羽习和金伟良^[9,10]结合不同类型钢筋锈后粘结拔出实验, 研究了锈蚀量对两种类型钢筋与混凝土粘结强度的影响, 给出了随时间和位置变化的钢筋与混凝土的粘结本构关系, 推导出了反应这种变化规律的位置函数和表达式, 但其重在理论表

^{*} 收稿日期: 2009-08-02; 修订日期: 2009-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878031); 交通运输部西部交通建设科技项目(200631800019); 湖南省应用基础重点项目(06FJ2008)

通讯作者: 王磊(1979—), 男, 工学博士, 讲师, 主要从事服役桥梁可靠性评估研究。E-mail: leiwlei@hotmail.com

达式的得出,锈蚀钢筋与混凝土的位置函数只反映锈蚀较严重的情况,并不代表各锈蚀情况。

本文在已有研究结果的基础上,结合开展拉拔实验,分析了锈胀裂缝宽度不同的钢筋混凝土试件在不同位置处的钢筋应变,进而推导了不同位置的钢筋与混凝土粘结应力,得出了随不同位置变化的粘结应力曲线,讨论了锈胀裂缝对钢筋混凝土不同位置粘结应力的影响。

1 锈蚀钢筋内贴片拔出试验

粘结试件尺寸为 $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$, 一侧保护层厚度为 30mm , 采用 425 号硅酸盐水泥, 中沙, 最大粒径小于 4cm 的碎石, C25 混凝土。混凝土配合比采用水泥:沙:石:水 = $1:1.73:3.5:0.38$ 。为开展快速腐蚀, 混凝土浇筑时在其中加入重量为水泥重量 3% 的 NaCl 。28 天混凝土立方体强度的试验值为 24.81MPa 。为防止加载端发生局部破坏, 使粘结应力分布更均匀, 钢筋加载端采用塑料套筒处理的无粘结段, 长度为 50mm , 如图 1 所示。

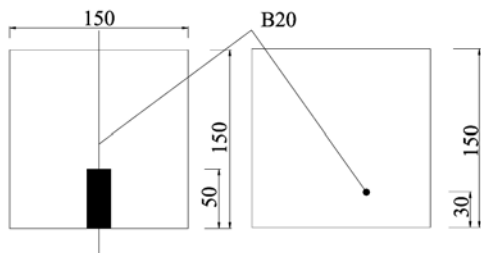


图 1 粘结试件尺寸图 (单位: mm)

Fig. 1 Size of pullout specimen (unit: mm)

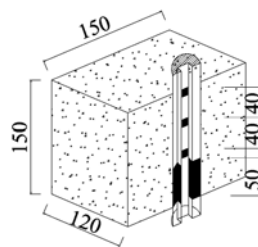


图 2 应变片布置 (单位: mm)

Fig. 2 Arrangements of the strain gauge (unit: mm)

试验中采用直径为 20mm 的变形钢筋, 且在混凝土中锚固长度为 100mm 。为布置内贴应变片, 将钢筋沿轴向对半切割开, 并用铣床在每半钢筋内侧加工尺寸为 $2\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的凹槽 (合拢后为 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$)。槽内布置尺寸为 $2\text{mm} \times 1\text{mm}$ 箔式电阻应变片, 其中每半钢筋中间隔 40mm 布置一应变片, 两半钢筋中应变片交错布置, 则合拢后相近应变片间距为 20mm , 共布置 6 个应变片。图 2 为内贴应变片的钢筋混凝土试件的纵剖图。

应变片用细直径的多股导线从钢筋内部引出, 为确定其位置, 在导线末端进行编号。用环氧树脂灌满整个凹槽, 并将两半钢筋粘结起来, 然后用钢丝将整根钢筋箍紧, 以确保两半钢筋粘结可靠, 如图 3 所示。试件浇注前用丙酮洗去钢筋表面的环氧树脂, 使其不影响钢筋与混凝土的粘结滑移性。试验中, 采用 7V14 数据采集器来测量各级荷载下钢筋的应变。



图 3 内贴应变片钢筋制作

Fig. 3 Production of reinforcement with strain gauge

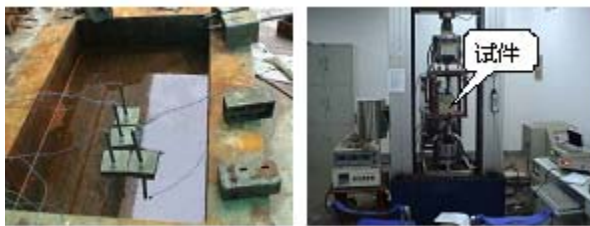


图 4 快速锈蚀后拉拔试验

Fig. 4 Pullout test after accelerated electrochemistry corrosion

试件共有 5 个, 其中一个为未锈试件, 其余均进行通电使其快速锈蚀, 锈胀裂缝宽度分别为 0.06mm 、 0.12mm 、 0.25mm 、 0.28mm 。试验根据《水运工程混凝土试验规程》(JTJ270-98)^[11]关于混凝土与钢筋握裹力试验规定, 自制了粘结拔出试验装置, 如图 4 所示, 采用最大量程为 30t 的万能试验机进行拉拔试验。

2 不同位置锈蚀钢筋应变

2.1 不同锈胀裂缝宽度下钢筋各位置应变

为清楚描述各位置钢筋应变,本文中规定 0cm 为自由端处,10cm 为加载端处,在 0~10cm 范围内,有间隔 2cm 应变片共 6 个。基于拉拔试验,不同试件变形钢筋各位置应变如图 5~图 9 所示。从图中可以看出,荷载较小时(4kN),不同位置的钢筋应变近似呈线性增长;随荷载的增大,自由端(0~4cm)的应变增长较小,曲线平缓,垂直作用力引起钢筋与混凝土间抵抗滑动力的提高,产生较小的峰值应变;中间段(4~6cm)的应变增长速度突然变大,由于套管约束引起附近锚固作用的增强,未锈钢筋试件曲线逐渐又显现出峰值应变,荷载越大,峰值越明显,且较靠近加载端,在加载端附近(距其约 2cm 处)应变又快速增大,应变曲线随荷载增大在不同位置的上下波动较大。

对于锈胀开裂试件,随锈蚀的加重,变形钢筋横肋受损,降低了钢筋与混凝土之间的咬合力,从而削弱了二者间的粘结作用,对钢筋应变产生影响。靠近自由端时,开裂对应变影响不大;靠近加载端时,钢筋应变曲线存在较大变异,不同荷载下各位置应变上下波动较小,未出现明显峰值应变,裂缝越宽,应变增长越慢。图 6~图 9 表明:随锈胀裂缝的增大,荷载对钢筋应变的影响逐渐减小,不同荷载下的曲线之间间距减小。由于样本数量的有限性,难免出现离散型,裂缝宽度达到 0.25mm 时,尤其图 8 中“2cm”位置处应变结果偏大,略微出现双峰情况,但从图 6~图 9 整体变化趋势来看,应变双峰随锈胀裂缝的增大逐渐退化。

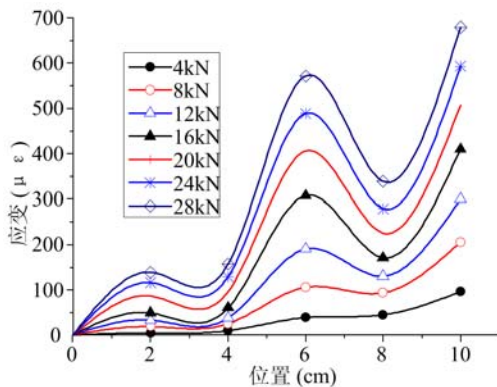


图 5 未锈试件中钢筋应变
Fig. 5 Reinforcement strain for uncorroded specimen

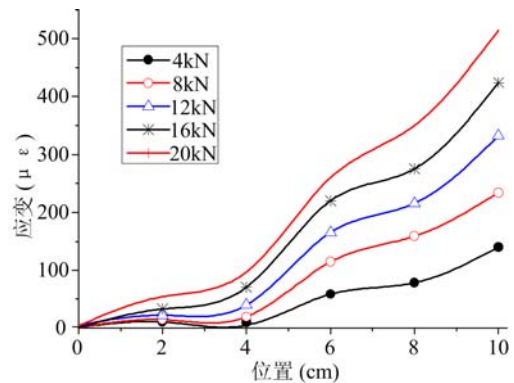


图 6 锈胀裂缝宽 0.06mm 试件中钢筋应变
Fig. 6 Reinforcement strain for specimen with 0.06mm crack

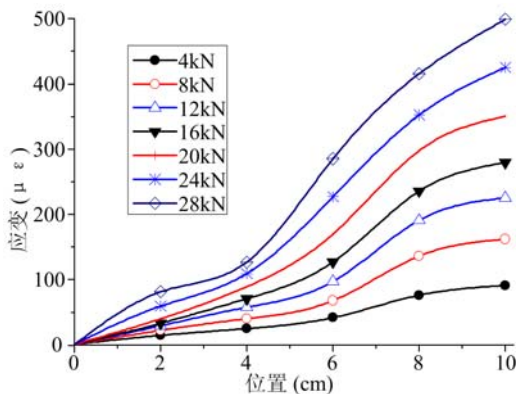


图 7 锈胀裂缝宽 0.12mm 试件中钢筋应变
Fig. 7 Reinforcement strain for specimen with 0.12mm crack

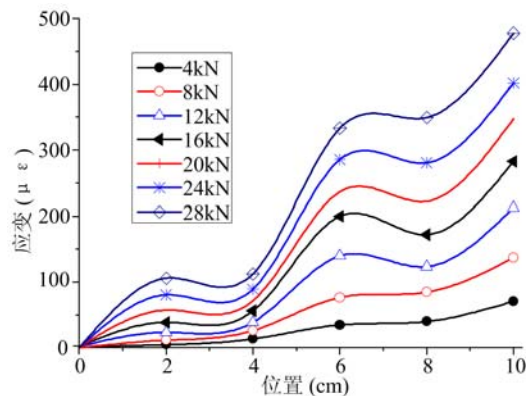


图 8 锈胀裂缝宽 0.25mm 试件中钢筋应变
Fig. 8 Reinforcement strain for specimen with 0.25mm crack

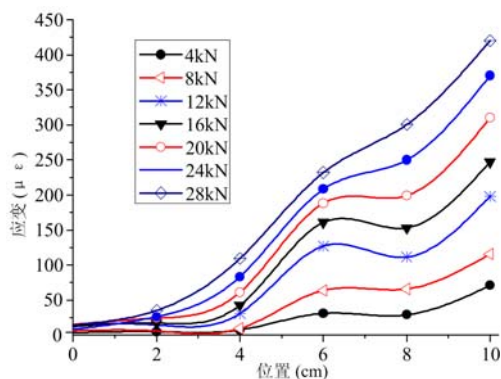


图 9 锈胀裂缝宽 0.28mm 试件中钢筋应变

Fig. 9 Reinforcement strain for specimen with 0.28mm crack

2.2 不同荷载下钢筋各位置应变

为研究加载大小与钢筋应变的关系,由试验结果得到了各荷载下的应变曲线,如图 10~图 13 所示。从图中可以看出,不同试件在相同荷载下的钢筋应变曲线也不相同。在较小荷载($<8\text{kN}$)时,应变曲线随位置变化平缓,距自由端很小范围内,锈胀试件的钢筋应变比未锈的稍大;靠近自由端($0\sim4\text{cm}$)时,试件裂缝宽度不超过 0.06mm 的钢筋应变比未锈的试件中钢筋应变大。随荷载的增大,中间段($4\sim6\text{cm}$)应变迅速增大,无锈胀裂缝试件的钢筋应变较大、增长较快,且在靠近加载端的过程中,其钢筋应变有较大波动并出现明显的峰值。

综上所述,荷载较小时,锈胀裂缝大小对应变的影响不明显,随荷载的逐渐增大,未锈试件的应变曲线比存在锈胀裂缝的试件变化更大,即锈胀裂缝越大,锈蚀钢筋的应变传递越慢,这也证实了 2.1 中的结论。

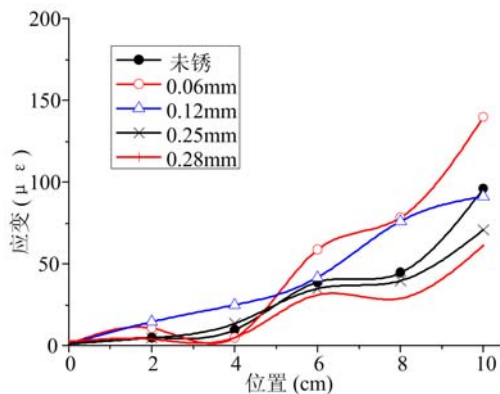


图 10 4kN 下各位置的应变

Fig. 10 Distributions of the reinforcement strain under 4kN

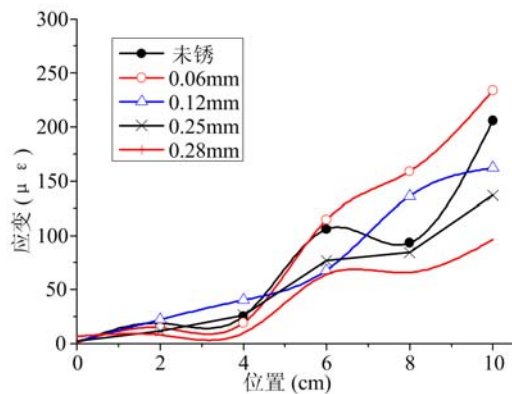


图 11 8kN 下各位置的应变

Fig. 11 Distributions of the reinforcement strain under 8kN

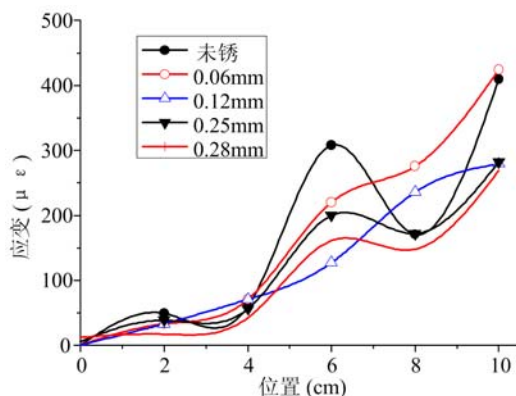


图 12 16kN 下各位置的应变

Fig. 12 Distributions of the reinforcement strain under 16kN

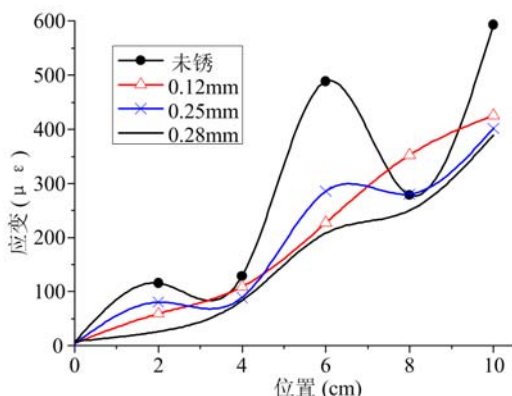


图 13 24kN 下各位置的应变

Fig. 13 Distributions of the reinforcement strain under 24kN

3 锈胀裂缝对粘结应力的影响

3.1 粘结应力的计算

拉拔试验直接测得的并非粘结应力,而是各测点的钢筋应变。钢筋应力应变关系已知的情况下,钢筋与混凝土间粘结应力可进一步由钢筋应力变化率求得:

$$\tau = \frac{A_s}{\pi d} \frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{d}{4} \frac{d\sigma_s}{dx} \quad (1)$$

式中, τ 为粘结应力; $d\sigma_s$ 为钢筋在 dx 长度内应力的变化; d 和 A_s 分别为钢筋直径和截面积。

计算粘结力时,最简便的方法是把式(1)视为一个非求导公式,进而可直接根据相邻两测点的应变差求得一个 τ 值,认为 τ 即为该段中点处的粘结应力。同理,对各个隔离段进行分析,可得沿钢筋长度方向各点的粘结应力。虽然这种方法直接,但不太符合实际情况,精度并不高。

一些学者假设在锚固区域中的钢筋应变分布足够光滑^[12],锚固区域由 $n+1$ 个应变测点分成 n 个区间,且每个区间的间距为 h ,则第 i 个测点 x_i+h 和 x_i-h 处钢筋应变函数的泰勒展开为:

$$\epsilon(x_i+h) = \epsilon(x_i) + h\epsilon'(x_i) + \frac{h^2}{2!}\epsilon''(x_i) + \frac{h^3}{3!}\epsilon'''(x_i) + O(h^4) \quad (2)$$

$$\epsilon(x_i-h) = \epsilon(x_i) - h\epsilon'(x_i) + \frac{h^2}{2!}\epsilon''(x_i) - \frac{h^3}{3!}\epsilon'''(x_i) + O(h^4) \quad (3)$$

两式分别相加减得:

$$\epsilon'(x_i) = \frac{\epsilon(x_i+h) - \epsilon(x_i-h)}{2h} - \frac{h^2}{6}\epsilon'''(x_i) + O(h^3) \quad (4)$$

$$\epsilon''(x_i) = \frac{\epsilon(x_i+h) + \epsilon(x_i-h) - 2\epsilon(x_i)}{h^2} + O(h^2) \quad (5)$$

将式(5)进行求导,代入式(4)右端的第二项,忽略误差项,并写成带下标的通项表达形式得:

$$\epsilon'_{i-1} + 4\epsilon'_i + \epsilon'_{i+1} = \frac{3}{h}(\epsilon_{i+1} - \epsilon_{i-1}) \quad (6)$$

式中, $\epsilon(x_i+h)$ 为 x_i+h 处应变; $\epsilon(x_i)$ 为 x_i 处应变; ϵ_{i+1} 为第 $i+1$ 个测点的应变。

由边界条件 $\epsilon'_0 = \tau_0 = \epsilon'_n = \tau_n = 0$, 令 $\delta\epsilon_i = \epsilon_{i+1} - \epsilon_{i-1}$, 则有方程组:

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & & & \\ & 1 & 4 & 1 & & \\ & & \dots & \dots & & \\ & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \dots \\ \tau_i \\ \dots \\ \tau_{n-2} \\ \tau_{n-1} \end{bmatrix} = \frac{3E_s}{h} \frac{d}{4} \begin{bmatrix} \delta\epsilon_1 \\ \delta\epsilon_2 \\ \delta\epsilon_3 \\ \dots \\ \delta\epsilon_i \\ \dots \\ \delta\epsilon_{n-2} \\ \delta\epsilon_{n-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)是严格主对角线占优的,为三对角阵方程,适合用追赶法求解。解此方程将得到各个应变测点处的粘结应力。

3.2 锈胀裂缝对粘结应力的影响

将试验中得到的钢筋应变数据代入到式(7)中,然后绘制出试件在各级荷载下的 $\tau-x$ 曲线。如图14~图18所示。

从图中可以看出,在两端附近各有一峰值。靠近自由端的峰值是由于垂直力作用引起钢筋与混凝土间抵抗滑动的摩阻力增大而产生的;加载端附近因套管端混凝土未胀裂的作用、荷载挤压作用引起局部刚度的提高,从而在其附近产生一个粘结锚固刚度的峰值。这两种作用随裂缝的加大逐渐减弱,由图15和图16可知,在锈胀裂缝小于0.12mm时,峰值的变化不大,裂缝超过0.25mm后,峰值迅速变小。

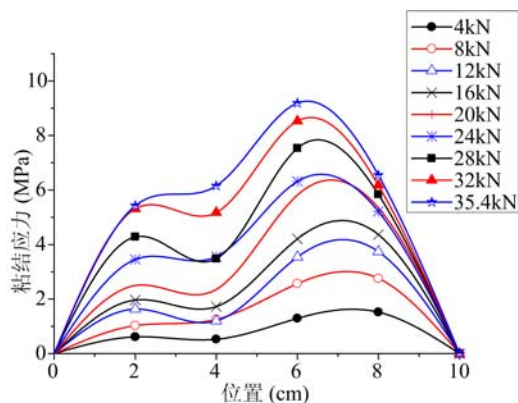


图 14 未锈试件的粘结应力

Fig. 14 Bond stress for uncorroded specimen crack

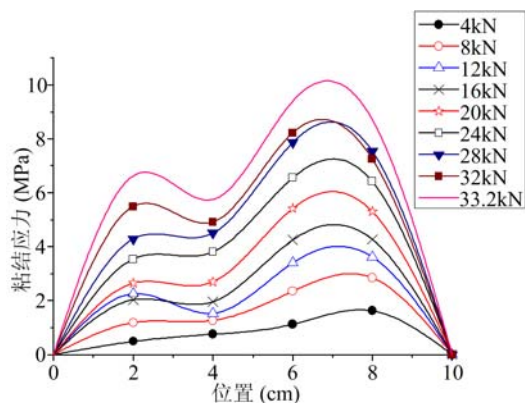


图 15 锈胀裂缝宽 0.06mm 试件的粘结应力

Fig. 15 Bond stress for specimen with 0.06mm crack

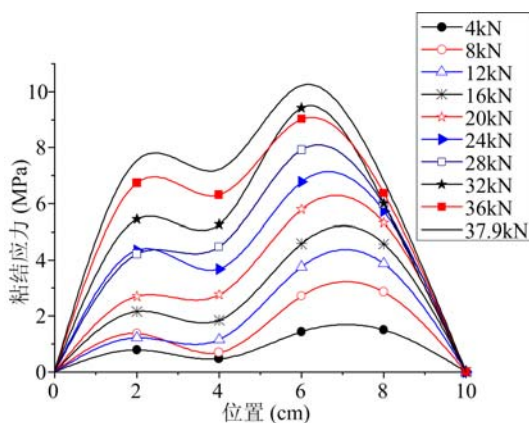


图 16 锈胀裂缝宽 0.12mm 试件的粘结应力

Fig. 16 Bond stress for specimen with 0.12mm crack

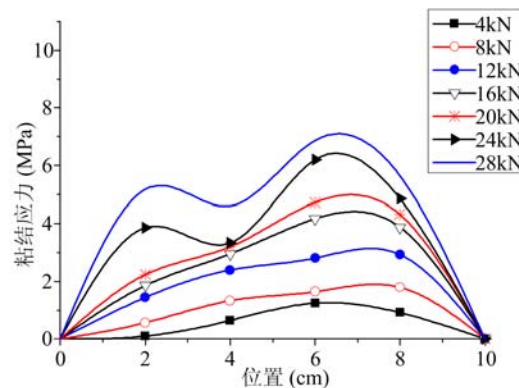


图 17 锈胀裂缝宽 0.25mm 试件的粘结应力

Fig. 17 Bond stress for specimen with 0.25mm crack

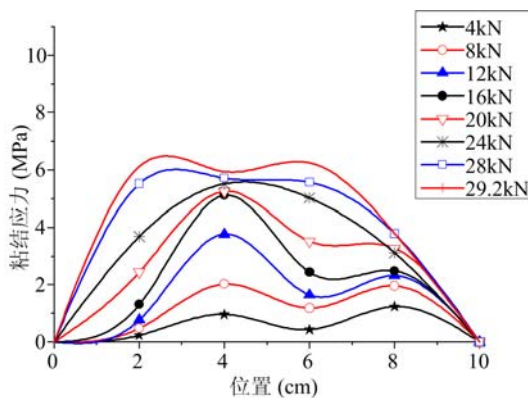


图 18 锈胀裂缝宽 0.28mm 试件的粘结应力

Fig. 18 Bond stress for specimen with 0.28mm crack

随着荷载的增加,粘结应力的峰值有向自由端移动的趋势。在锈蚀较小时,钢筋锈蚀加大了钢筋和混凝土间的摩擦力,对于未锈和锈胀裂缝较小的试件,荷载挤压作用引起的局部刚度提高明显,其粘结应力峰值靠近加载端,存在 0.06mm 和 0.12mm 裂缝的试件比未锈试件的粘结应力值略有增大,如图 14~图 16 所示。

随着锈胀裂缝的逐渐增大,混凝土对钢筋的握裹作用力降低;再者,钢筋与混凝土之间的胶着力也因锈蚀加深而遭到破坏,最终导致锈蚀钢筋与混凝土间的粘结作用退化,在拉拔力接近情况下,要完成钢筋与混凝土之间的应力传递需要的粘结长度增加。因此,对于锈胀裂缝较大的试件,加载附近套管端混凝土对钢筋的约束作用迅速降低,其粘结应力分布越趋均匀,粘结应力峰值更靠近自由端,而且越靠近自由端,其粘结应力增长的幅度越大。如图 18 所示,甚至有的试件粘结应力峰值在 4cm 处。

4 结语

本文通过对锈蚀钢筋混凝土内贴片拔出试件的试验研究,主要得到以下结论:

(1) 随锈蚀程度的加深,变形钢筋横肋受损,降低了钢筋与混凝土之间的机械咬合力,粘结试件中的钢筋应变对锈胀裂缝宽度的敏感性大,锈胀裂缝越大,锈蚀钢筋的应变传递越慢,应变的双峰现象逐渐退化。

(2) 锈蚀钢筋与混凝土间的粘结应力在两端各有一峰值,且随锈胀裂缝的加大应力峰值有变小的趋势。锈胀开裂试件与未开裂试件随位置变化的粘结应力曲线存在差异。对于锈胀裂缝较小的试件,其粘结应力峰值靠近加载端;而对于锈胀裂缝较大的试件,粘结应力峰值更靠近自由端。

(3) 本文开展试件表面不同锈胀裂缝宽度对粘结性能的影响试验是建立在小样本的基础上,较难避免离散型影响,锈胀裂缝大小对粘结性能的影响还需进一步研究。由于刨开钢筋后,钢筋的实际锈蚀率很难准确测得,因此,如何更加精确获得锈蚀率变化下各位置粘结应力,进而推导粘结应力—滑移关系,也需进一步的研究。

参考文献:

- [1] Almusallam Abdullah A, Al-Gahtani Ahmad S, Aziz Abdur Rauf and Rasheeduzzafart. Effect of reinforcement corrosion on bond strength[J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(2): 123—129.
- [2] Lee Han-Seung, Noguchi Takafumi, Tomosawa Fuminori. Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(8): 1313—1318.
- [3] Mangat P S, Elgarf M S. Bond characteristics of corroding reinforcement in concrete beams[J]. Materials and Structures/Materlauxet Constructions, 1999, 32: 89—97.
- [4] Bhargava Kapilesh, Ghosh A K, Mori Yasuhiro, Ramanujam S. Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete-Analytical and empirical models[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237: 1140—1157.
- [5] Chung Lan, Kim Jang-Ho Jay, Yi Seong-Tae. Bond strength prediction for reinforced concrete members with highly corroded reinforcing bars[J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30: 603—611.
- [6] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 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): 47—52 (Yuan Yingshu, Jia Fuping, Cai Yue. The structural behavior deterioration model for corroded reinforced concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 47—52 (in Chinese))
- [7] Sonmayaji S, Shan S P. Bond Stress Versus Slip Relationship Cracking Response of Tension Members[J]. ACI Journal, Proceedings, 1981, 78(3): 217—224.
- [8] 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 (Zhang Weiping, Zhang Yu. Bond-slip relationship between corroded steel bars and concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 40—44 (in Chinese))
- [9] 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 (Zhao Yuxi, Jin Weiliang. Test study on bond stress-slip relationship of concrete and steel bar[J]. Journal of Building Structures, 2002, 23(1): 32—37 (in Chinese))
- [10] 金伟良, 赵羽习. 随不同位置变化的钢筋与混凝土的粘结本构关系[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(1): 1—6 (Jin Weiliang, Zhao Yuxi. Study on the bond stress-slip relationship variation with the position[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(1): 1—6 (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国交通部. JTJ270-98 水运工程混凝土试验规程[S]. 人民交通出版社, 2004 (P. R. China. Ministry of Communications. JTJ270-98 Testing regulations of marine traffic engineering concrete[S]. China Communications Press, 2004 (in Chinese))
- [12] 洪小健, 张誉. 粘结滑移试验中的粘结应力的拟合方法[J]. 结构工程师, 2000(3): 44—48 (Hong Xiaojian, Zhang Yu. The Fitting Method of the Smooth Bondstress in the Bond-Slip Test[J]. Structural Engineers, 2000 (3): 44—48 (in Chinese))

Experimental Research on Bond Property between Corroded Deformed Reinforcement and Concrete

WANG Lei, MA Ya-fei, ZHANG Jian-ren, DENG Ming

(School of Civil & Architecture Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to study the effect of crack induced by corrosion on the bond property between reinforcement and concrete, pullout tests for bonding specimens with deformed reinforcing bar and interiorly adhibited strain gauge were carried out. The test specimens were produced by accelerated corrosion. Different reinforcement strains were obtained, therefore the bond stresses between reinforcement and concrete were derived. The effect of corrosion cracks on bond stress between the reinforcement and concrete was analyzed. Experimental results show that the sensitivity of reinforcement strain on corrosion crack width is significant; for specimens with narrow crack, peak bond stress mainly appears near the loading end; for specimens with wide crack, peak bond stress is close to the free end.

Keywords: bridge engineering; corrosion crack; reinforcement strain; bond stress; pullout experiment