

钢筋混凝土梁腐蚀后疲劳性能的试验研究

王海超^{1,2} 贡金鑫¹ 曲秀华¹

(1. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 山东科技大学, 山东 青岛 266510)

摘要: 对先人工腐蚀和预裂后再人工腐蚀的钢筋混凝土梁试件进行了静力荷载和高周疲劳荷载试验研究, 比较了腐蚀对钢筋混凝土梁静力性能和疲劳性能的影响。研究表明, 当钢筋腐蚀率较低 (小于5%) 时, 钢筋混凝土梁的静承载力没有明显的变化, 但在高周反复荷载作用下, 梁疲劳承载力大为降低, 特别是试验前预腐蚀的梁, 疲劳寿命仅为未腐蚀梁的26%。疲劳承载力降低的原因是局部腐蚀 (即使程度很小) 导致梁中钢筋出现微缺陷, 或使已有的微缺陷扩大, 加速了钢筋微裂纹的扩展。所以, 对于腐蚀环境中承受反复荷载作用的钢筋混凝土结构, 设计中应特别注意腐蚀对结构疲劳性能的影响。

关键词: 钢筋混凝土; 腐蚀; 疲劳; 疲劳寿命

中图分类号: TU375.1, TG174.3⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2005) 11-0032-07

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF CORRODED REINFORCED CONCRETE BEAMS

Wang Haichao^{1,2} Gong Jinxin¹ Qu Xiuhua¹

(1. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Shandong University of Science & Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract: An experimental study was performed to examine the static and fatigue behavior of lightly corroded reinforced concrete beams. It indicates that the static behavior of lightly corroded reinforced concrete beams almost remains unchanged, whereas the fatigue behavior degrades considerably; more specifically, for the cracked and corroded beam, the fatigue life is just 26% of that of the beam without corrosion. It is the local corrosion that causes the occurrence of micro-defect of reinforcement or enlarges the existing defect that speeds up the expansion of micro-cracks. As a result, special care should be taken for reinforced concrete structures in harsh environment and subjected to repeating load to avoid corrosion fatigue failure.

Keywords: reinforced concrete; corrosion; fatigue; fatigue life

引言

对于一些长期处于高温、高湿及腐蚀环境中的钢筋混凝土结构, 如港口码头、海洋采油平台、公路和铁路桥梁、化工工业及冶金工业的选矿、烧结、焦化、化工、冶炼、铸造、造纸、电解、印染等的工业厂房, 由于环境的影响, 加之经年复杂荷载的作用, 结构构件会出现不同程度的损伤, 造成构件使用性能和承载力不同程度的降低^[1]。关于腐蚀对构件承载力的影响, 目前的认识和研究主要集中在静力性能方面, 如已对锈蚀后钢筋混凝土构件的承载力、钢筋与混凝土的粘结性能等进行了大量的研究, 基本结论

是, 钢筋锈蚀率小于5%时, 构件静承载能力无显著降低^[2-4], 甚至还可能略有提高, 这是微弱的锈蚀使钢筋与混凝土的粘结性能提高的缘故。也就是说, 若钢筋锈蚀率不高, 构件能够保持所具有的安全性。但是, 对于实际工程中的结构, 除承受静力荷载作用外, 很多情况下还承受反复荷载的作用, 如公路和铁路桥梁、海洋采油平台、工业厂房的吊车梁等, 在正常情况下 (即不锈蚀), 反复荷载会使构件产生累积损伤而发生疲劳破坏^[5], 所以规范要求对这些结构进行疲劳强度验算。毋庸置疑, 当钢筋混凝土构件受到环境腐蚀时, 其疲劳性能也会降低, 但截至目前, 有关的研究很少, 对构件腐蚀后疲劳性能的变化仍不甚了解。这显然与工程实践对钢筋混凝土结构安全性和耐久性研究的要求是不相适应的。

钢筋混凝土构件的疲劳破坏, 除混凝土受剪和受压破坏外, 主要表现为钢筋受反复拉应力的作用而发

生断裂, 断裂要经历裂缝萌生、扩展等几个阶段。钢筋疲劳裂纹的萌生, 可以是钢筋表面的微裂隙、夹杂物、气泡、表面缺陷等原因。在惰性介质中, 疲劳裂纹的萌生寿命要占到构件整个疲劳寿命的 90%^[6], 如果钢筋受到腐蚀, 还应包括锈蚀造成的蚀坑^[7], 锈蚀也会使原有的缺陷进一步增大。本文将通过试验研究钢筋混凝土梁锈蚀率较低的情况下, 其疲劳性能的变化, 从而为腐蚀环境中承受反复荷载作用的钢筋混凝土结构的耐久性设计、评估提供参考。

1 试验概况

试验采用尺寸为 $b \times h \times l = 120\text{mm} \times 200\text{mm} \times 1700\text{mm}$ 的梁试件, 计算跨度为 $l_0 = 1500\text{mm}$, 共 8 根。梁受力简图和截面形式如图 1 所示。混凝土强度等级为 C30, 纵向钢筋牌号为 HRB335。试件分为两组, 如表 1 所示, 一组进行静力试验, 一组进行空气中的疲劳试验。静力试验和疲劳试验均在 MTS 液压

伺服疲劳试验机上进行, 采用四点弯曲加载方式, 由计算机控制加载, 控制方式为力控制, 荷载波形为正弦波。疲劳试验采用等幅加载, 最大荷载为 36.5kN, 最小荷载为 7kN, 平均荷载为 21.75kN, 试验的频率为 4Hz。静力试验和疲劳试验中的三个试件在试验前均进行了人工电化学锈蚀, 锈蚀率控制在 5% 以内, 以研究微弱锈蚀对试件静力性能和疲劳性能的影响。电化学锈蚀在特制的钢槽中进行, 钢槽内涂两层环氧树脂, 以防锈蚀过程中被腐蚀。锈蚀试验时钢筋作阳极, 试件下面的不锈钢板作阴极。制作试件前对钢筋逐根称重, 作为钢筋锈蚀前的初始重量。达到锈蚀的预定程度后, 即进行静力或疲劳试验。试件破坏后, 将其混凝土砸碎, 取出钢筋, 用稀释的盐酸清洗, 除去钢筋表面的附锈, 待钢筋晾干后再称取钢筋的重量, 计算钢筋的实际锈蚀率, 测量结果见表 1。试件 A-4 和 A-8 在钢筋锈蚀前预先施加一定的荷载, 使梁底混凝土开裂, 然后再进行腐蚀, 目的是研究开裂后腐蚀对试件静力性能和疲劳性能的影响。

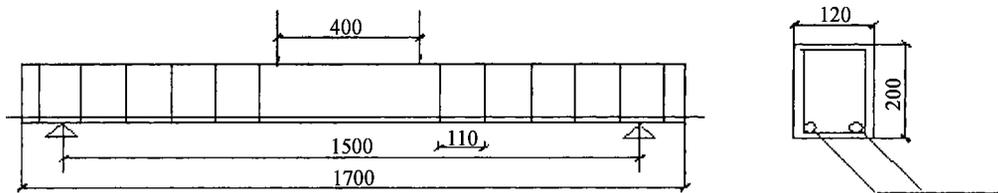


图 1 试验梁尺寸及配筋

Fig 1 Dimension and reinforcement of experimental beam

表 1 腐蚀后钢筋混凝土梁静力和动力性能试验结果

Table 1 Static and dynamic experimental results of corroded reinforced concrete beam

试件编号	静力试验			试件编号	疲劳试验		
	钢筋锈蚀率(%)	极限承载能力(kN)	破坏形态		钢筋锈蚀率(%)	疲劳寿命(次)	破坏形态
A-1	0	56.92	钢筋屈服	A-5	0	602767	钢筋断裂(2根)
A-2	2.98	60.78	钢筋屈服	A-6	3.65	476899	钢筋断裂(1根)
A-3	3.32	54.86	钢筋屈服	A-7	2.73	465000	钢筋断裂(1根)
A-4(预裂)	3.88	54.39	钢筋屈服	A-8(预裂)	2.72	154000	钢筋断裂(1根)

2 静力试验结果与分析

2.1 静力荷载作用下梁的破坏形态

图 2 示出了 A-1 和 A-4 梁静力试验的破坏形态。A-1 梁未进行腐蚀, 作为静力试验的基准梁。由图 2 可以看出, 外观上钢筋锈蚀梁的破坏形态与未锈蚀的梁没有大的区别, 都是钢筋屈服后混凝土压溃这种典型的适筋破坏形式, 所有梁的横向裂缝开展得

也比较均匀。由于钢筋腐蚀产生的膨胀力, 腐蚀后的梁都出现了顺筋纵向裂缝, A-2、A-3 和 A-4 梁的最大裂缝宽度分别为 0.25mm、0.25mm (侧面) 和 0.35mm。最大裂缝宽度基本与钢筋腐蚀率相对应。纵向裂缝的出现, 使腐蚀的梁破坏过程与未腐蚀的梁有小的差别, 即在接近破坏时, 锈蚀的梁在纯弯曲段出现了明显的粘结破坏, 或沿梁侧面, 或在梁底部, 有的梁底混凝土被横向裂缝和纵向裂缝割离后剥离, 如 A-4, 同时显露出明显的钢筋锈斑。

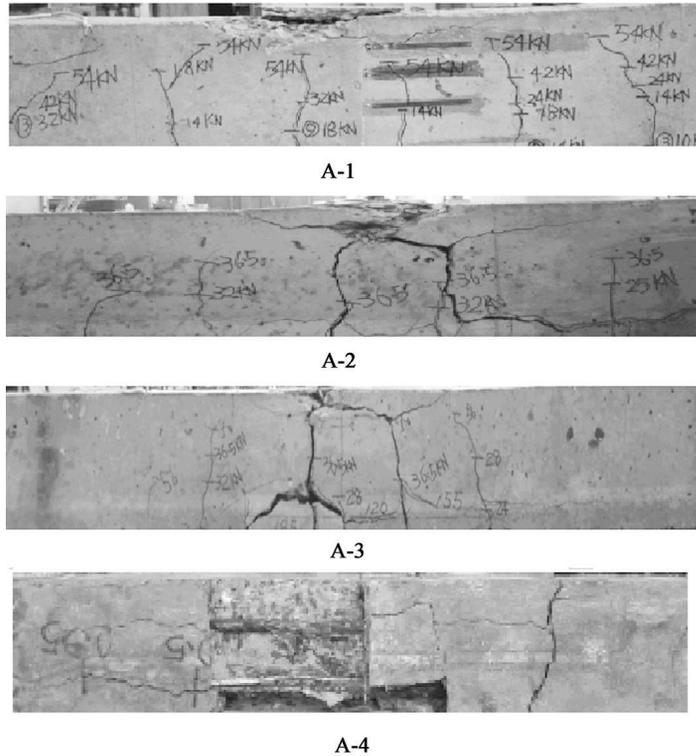


图2 A-1 鷓 A-4 梁的破坏形态

Fig 2 Damage patterns of beams A-1 鷓 A-4

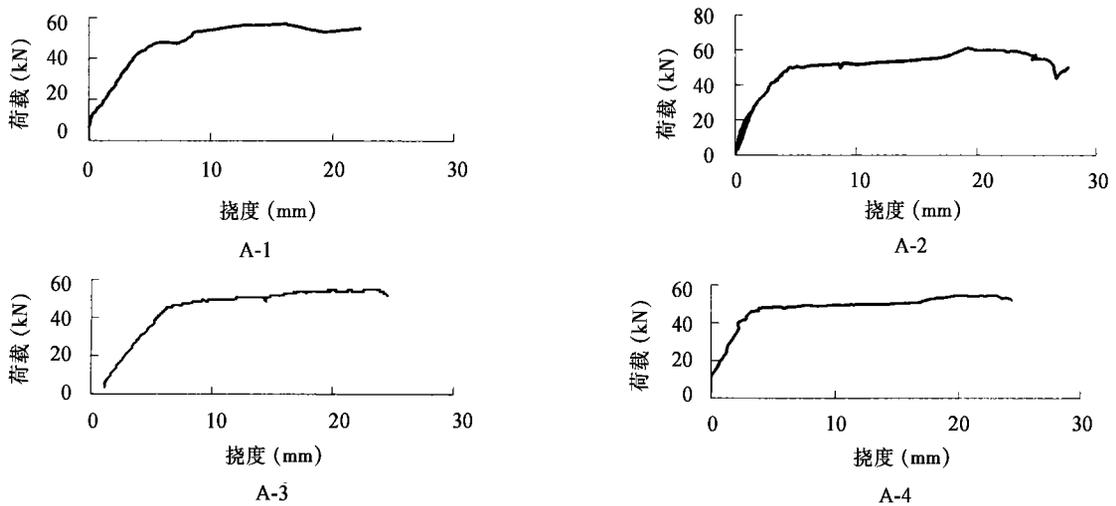


图3 A-1 鷓 A-4 梁的静力荷载—挠度曲线

Fig 3 Static load-deflection curves of beams A-1 鷓 A-4

2.2 静力荷载作用下梁的荷载—挠度曲线

梁的荷载—挠度曲线，在一定程度上反映了梁在整个加载过程中力学性能的变化，如梁的开裂荷载、屈服荷载、极限强度及刚度和延性。图3示出了A-1 鷓 A-4 梁的荷载—挠度曲线。由图可以看出，梁的开裂荷载有一定差别，对于A-1、A-2、A-3和A-4 梁，开裂荷载依次为10kN、21kN、24kN和16kN。A-2和A-3 梁的开裂荷载比较高，这可能与钢筋轻微锈蚀使钢筋与混凝土的粘结力有所增强的缘

故，也可能与梁开裂荷载的随机性有关。由于本文梁的钢筋锈蚀率较低，不超过4%，梁劣化现象不明显，梁的屈服荷载和极限承载力没有明显的变化，如A-1 梁的钢筋没有锈蚀，极限承载力为56.92kN，而A-2、A-3和A-4 梁的极限承载力分别为60.78kN、54.86kN和54.39kN。A-1、A-2、A-3和A-4 梁的荷载—挠度曲线没有本质的不同，均表现为钢筋混凝土适筋梁典型的开裂—钢筋屈服—混凝土压碎的三阶段特征。图4示出了试验过程中梁受拉

钢筋与受压混凝土应变的变化。由图 4 可以看出，腐蚀梁的钢筋应变和混凝土应变的增长，与未腐蚀的梁基本一致。这进一步表明，当钢筋的锈蚀率较低时，锈蚀对梁的静力性能没有明显的影响，尽管钢筋锈蚀会造成钢筋与混凝土的粘结破坏和产生局部蚀坑出现应力集中。A-4 为在钢筋电化学锈蚀前已人为产生裂缝的梁，在裂缝处有明显的腐蚀，但也未达到显著影响构件极限承载力的程度。

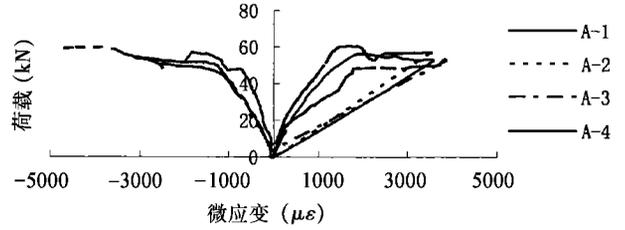


图 4 A-1 到 A-4 梁钢筋、混凝土的荷载—应变曲线

Fig 4 Load-strain curves in rebars and concrete of beams A-1 to A-4

3 疲劳试验结果与分析

3.1 疲劳荷载下梁的破坏形态

图 5 所示为疲劳荷载作用下 A-5 到 A-8 梁的破坏形态

坏形态，所有试验梁均以钢筋疲劳断裂的形式破坏。与未腐蚀的 A-5 梁相比，A-6、A-7 和 A-8 梁疲劳断裂之前在纯弯段即已出现了局部的粘结破坏，这与腐蚀导致的梁顺筋纵向裂缝有关。A-6、A-7 和

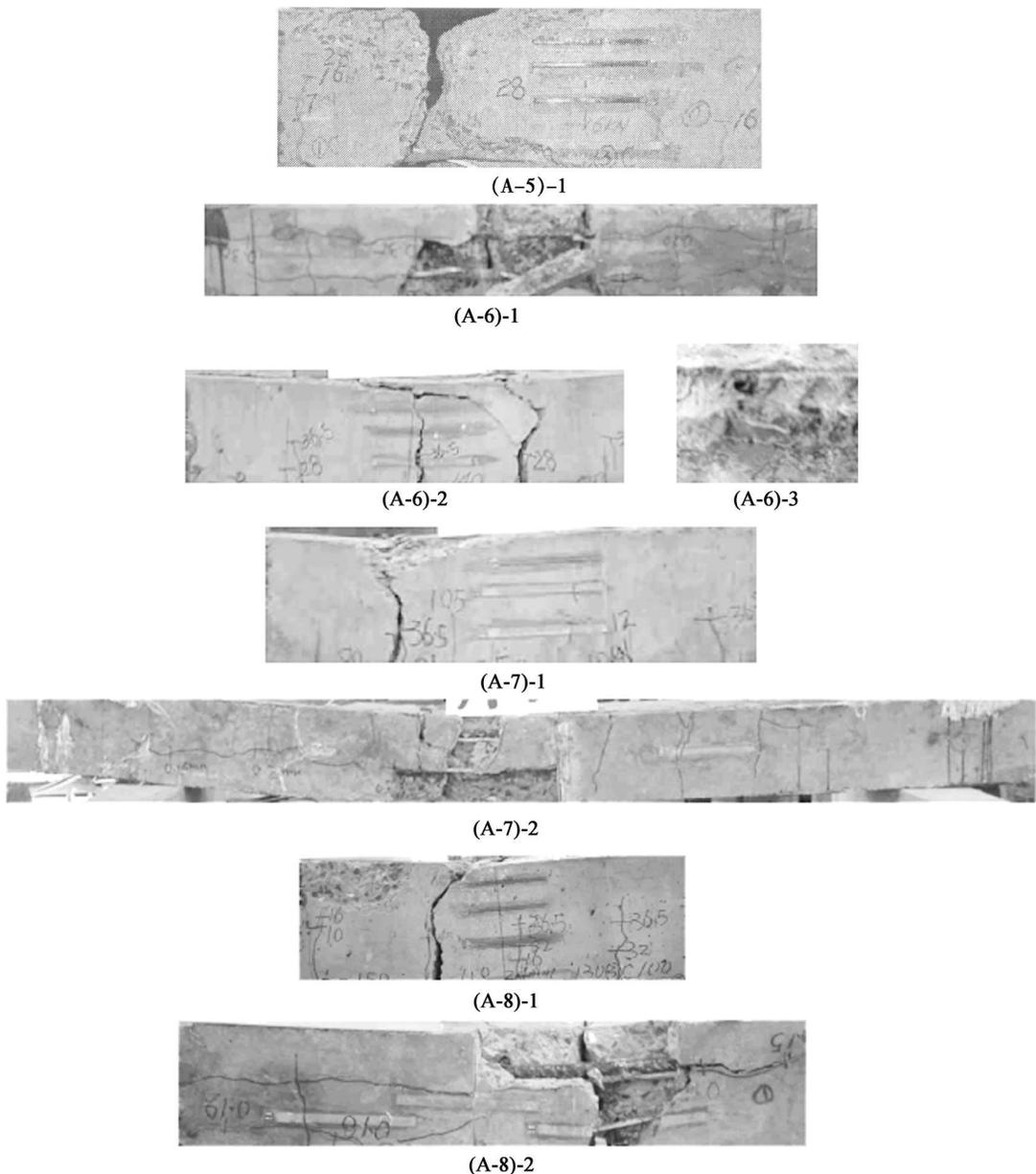


图 5 A-5 到 A-8 梁的破坏形态

Fig 5 Damage patterns of beams A-5 to A-8

A-8 梁纵向顺筋裂缝的最大宽度分别为 0.35mm、0.2mm 和 0.19mm。与静力试验的梁相比，就与整个试验过程的比例来看，疲劳试验粘结破坏发生的要早，这是反复加载—卸载造成的结果，但梁最终还是因钢筋断裂而破坏，说明梁的破坏还是由疲劳裂纹扩展导致的，但局部粘结破坏会使梁内钢筋发生应力重分布，增大裂缝萌生的机会。可以预计，如果腐蚀很严重，梁也可能发生粘结破坏，这有待于进一步的研究。

3.2 疲劳荷载下梁的挠度—循环荷载曲线及挠度—荷载循环次数曲线

如上所述，本研究中钢筋混凝土梁的疲劳破坏，是钢筋的疲劳断裂。根据对金属材料疲劳断裂机理的分析，钢筋的疲劳断裂过程，是其在承受交变荷载作用的过程中，疲劳裂纹萌生、稳定扩展、不稳定扩展和断裂的过程。正常使用环境下，钢筋表面的冶炼缺陷往往是产生裂纹源的地方。在反复应力作用下，一旦形成初始裂纹，将不断扩展直至断裂。但是，如果钢筋遭受腐蚀，将会在钢筋表面形成锈坑，这样锈坑也可能成为疲劳初始裂纹。另外，钢筋的冶炼缺陷也往往存在电位差，从而成为局部腐蚀的阳极，也就是说钢筋表面有缺陷的地方也是容易发生锈蚀的地方。所以钢筋锈蚀对梁的疲劳性能更为不利。

图 6 为未腐蚀的 A-5 梁在不同荷载循环次数时加载、卸载的荷载—挠度曲线，由图可以看出，残余变形主要发生在前数个荷载循环，随着荷载循环次数的增多，相同荷载循环次数时的残余变形逐渐减少，而且曲线接近于直线，这是典型的受反复荷载作用的钢筋混凝土构件的荷载—挠度曲线。图 7 为 A-5 梁

A-8 梁的挠度—荷载循环次数曲线，横坐标采用对数坐标，便于观察整个试验过程中试件变形的发展规律，其中标注为 36.5kN 的曲线为最大荷载时梁的变形曲线，标注为 21kN 的曲线为平均荷载时梁的变形曲线，标注为 7kN 的曲线为最小荷载时梁的变形曲线，这三种情况的变形均为瞬时变形与残余变形之和，标注为 0kN 的曲线为卸载时梁的变形曲线，变形为残余变形。由图 7 可以看出，挠度—荷载循环次数曲线呈 S 形，前后的快速上升段都比较短，而中间段相对较长，这是典型的钢筋混凝土梁的挠度—荷载循环次数曲线，虽然各梁的疲劳寿命不同，但循环荷载最大值、最小值和平均值所对应的挠度发展规律基本是相同的。A-8 为预开裂的梁，其后期的挠度有明显的增长，由于试件数目较少，有关的现象还有待于进一步解释。总的来讲，当梁遭受轻微的腐蚀时，其变形随循环次数变化的规律基本没有改变。

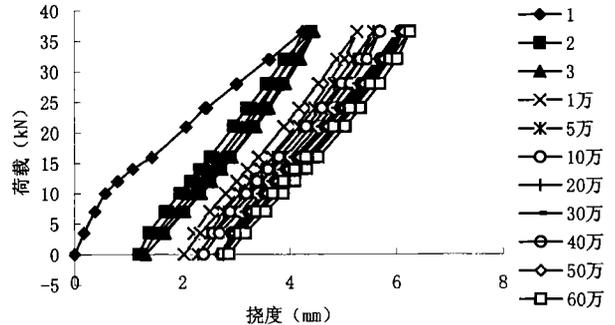


图 6 A-5 梁不同荷载循环次数时加载、卸载的挠度—荷载曲线

Fig 6 Deflection-load curves of beam A-5 during loading and unloading with various loading-unloading cycles

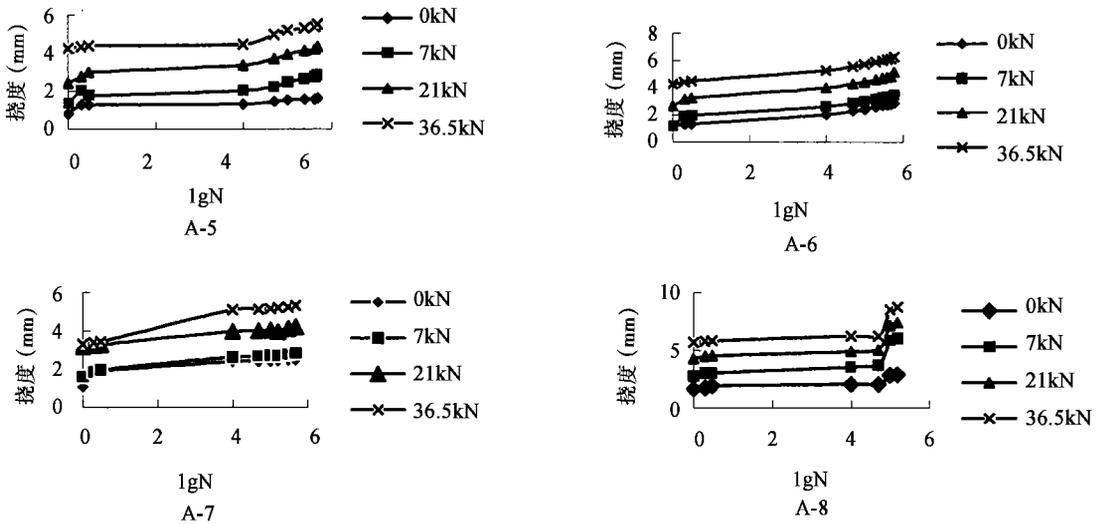


图 7 A-5 梁 A-8 梁不同荷载时的挠度—荷载循环次数曲线

Fig 7 Deflection-loading cycle curves of beams A-5 梁 A-8 with various loadings

3.3 钢筋锈蚀对梁疲劳寿命的影响

前面已经看到,当钢筋轻微腐蚀时,梁的挠度与荷载循环次数的关系曲线形式与未腐蚀的梁没有大的区别,尽管如此,但同等循环荷载下受腐蚀梁的疲劳寿命却有很大降低,A-6、A-7和A-8梁与A-5梁疲劳寿命的比值分别为0.79、0.77和0.26,尤其是A-8梁,疲劳寿命降低了74%。这说明与静力荷载作用的情形不同,轻微的腐蚀就会使钢筋混凝土梁的疲劳寿命大大缩短。目前普遍认为,材料或构件的疲劳破坏是微缺陷萌生了微裂缝,微裂缝经过稳定扩展、不稳定扩展,最终导致构件断裂。显然,锈蚀造成的锈坑或是增多了钢筋表面微缺陷的数目,或是通过锈蚀作用使原有的微缺陷增大,这些缺陷都使材料或构件产生了应力集中。已有的金属材料的腐蚀疲劳研究表明⁹,未腐蚀时材料微裂缝萌生的时间约占材料疲劳总寿命的90%,而当材料受到腐蚀时,微裂缝萌生的时间大大缩短,缩短的程度与腐蚀程度有关。

为了证实上面的论点,图8示出了受腐蚀钢筋清洗后的表面状况。从图8可以看出,腐蚀后梁的钢筋都存在明显的、大小不等的蚀坑,这些蚀坑未来会发展为钢筋的断裂裂缝。具体哪些锈坑会发展,还要看裂缝扩展的敏感性及应力的分布。对于钢筋混凝土构件来讲,钢筋应力分布很不均匀,裂缝处应力大,距裂缝远处应力小,但随着荷载循环次数的增多,钢筋应力会发生重分布。然而,构件裂缝处总是易于腐蚀且应力最大的地方,所以裂缝处易于发生疲劳断裂。A-8是人工开裂后预腐蚀的梁,其疲劳寿命最低,也说明了钢筋表面局部的严重损伤与应力水平对构件疲劳寿命的影响。总之,对钢筋混凝土构件静力性能影响不大的轻微腐蚀,对疲劳性能影响会很大。这对腐蚀环境下承受反复荷载作用的钢筋混凝土结构的耐久性设计和评估是非常重要的,一些表面看似腐蚀不严重的结构,在反复荷载不大时发生了破坏,可能与此有关。

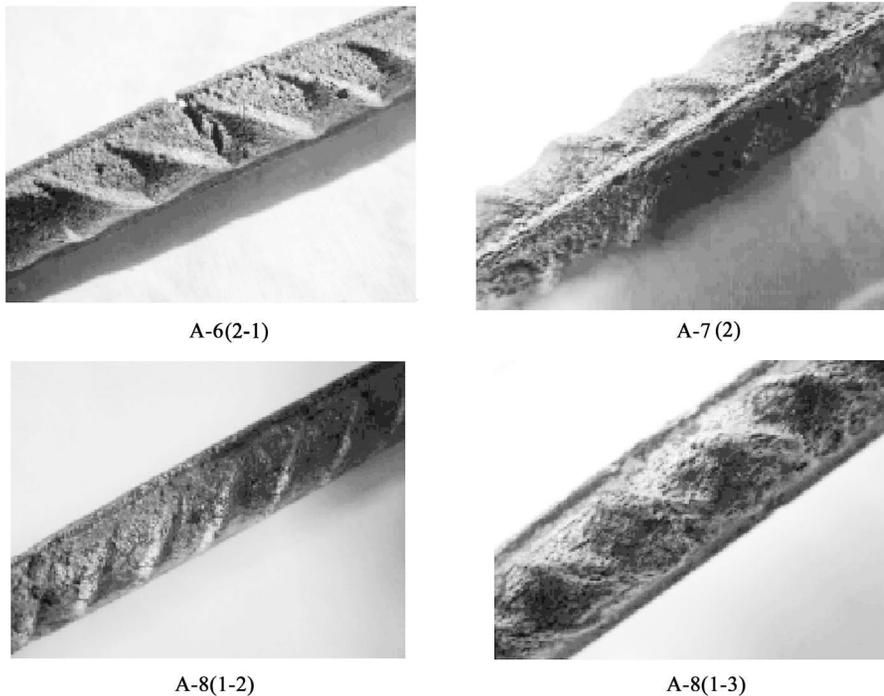


图 8 受腐蚀梁钢筋清洗后的表面状况

Fig 8 Surface condition of croded rebars after being washed

4 结 论

本文研究了腐蚀后钢筋混凝土构件的静力和疲劳性能,根据试验结果得出如下结论:

(1) 当钢筋锈蚀率较低(重量损失率小于5%)时,钢筋混凝土梁的静力荷载—挠度曲线与未腐蚀的梁略有不同,但没有明显的变化,梁的承载力基本没

有降低,即微小的锈蚀不影响梁的静承载力。

(2) 当钢筋锈蚀率较低时,承受反复荷载作用钢筋混凝土梁的挠度—荷载循环次数关系与未腐蚀的梁相似,但梁的疲劳寿命却大为降低,特别是梁预开裂钢筋受到腐蚀后。这表明轻微腐蚀对钢筋混凝土梁的疲劳寿命有明显影响,在工程实践中应予以足够的重视。

(下转第 101 页)

程,一般在起火后的 2 稿 10 min 内,即爆发成灾,温度达到最高。

(4) 火灾时,隧道断面最高温度受火灾规模和通风风速的影响,火区,最高温度随风速的增大而减小,随火灾规模的增大而增大。火区下游,最高温度先随通风风速的增大而增大,当风速超过 2 稿 3 m/s 后,则随通风风速的增大而减小;在同等风速下,最高温度随火灾规模的增大而增大。

闫治国 博士生。主要从事地下工程领域研究工作。通讯地址:200092 上海四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系博士信箱 E-mail: yanzg@126.com

杨其新 教授。主要从事地下工程领域教学研究工作。

朱合华 教授,博士生导师。主要从事地下工程领域教学研究工作。

参 考 文 献

- [1] 张兴凯. 地下工程火灾原理及应用 [M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 1997
- [2] 闫治国. 长大公路隧道火灾研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2002
- [3] 杨其新等. 国内外隧道消防方法及火灾实例调研报告 [R]. 成都: 西南交通大学, 1996
- [4] 肖中平等. 火灾时隧道内温度分布规律初探 [R]. 成都: 西南交通大学, 1995

(上接第 37 页)

(3) 钢筋混凝土梁轻微腐蚀后疲劳寿命降低与腐蚀产生的锈坑有关,或腐蚀加重了原有的缺陷,应力集中更明显,缩短了疲劳裂纹萌生的时间。

参 考 文 献

- [1] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与防护技术 (3) [J]. 工业建筑, 1999, 29 (10): 60-63
- [2] Pritpal S M, Mahmoud S E. Flexural strength of concrete beam with corroding reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96 (1): 149-158
- [3] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测 [M]. 北京: 科

学出版社, 2002

- [4] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性 [M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] 山田健太郎, 石黑幸文, 加藤雅史. 桥梁の动応力测定と疲劳寿命评价 [A]. 土木学会论文集 [C], 1991: 203-211
- [6] 李强, 周昌玉, 黄文龙, 等. 加载频率变化的腐蚀疲劳裂纹扩展速率数学模型 [J]. 南京工业大学学报, 2000, 22 (1): 32-36
- [7] 褚五扬, 乔立杰, 陈奇志, 等. 断裂与环境断裂 [M]. 北京: 科学出版社, 2000

王海超 博士, 副教授。主要从事钢筋混凝土结构理论、环境与混凝土结构、腐蚀环境下钢筋混凝土结构的静动力性能研究。通讯地址: 266510 山东省青岛市经济技术开发区前湾港路 579 号山东科技大学土木建筑学院 E-mail: hch-wang6031@163.com

贡金鑫 博士, 副教授。主要从事工程结构可靠性、耐久性、钢筋混凝土结构动力性能及大型结构计算理论的研究。

曲秀华 实验师。

(上接第 44 页)

贡金鑫 博士, 副教授。主要从事工程结构可靠性、耐久性、钢筋混凝土结构动力性能及大型结构计算理论的研究。通讯地址: 116024 辽宁省大连市大连理工大学土木水利学院结构工程研究所 E-mail: gong_jx.vip@eyou.com

李金波 博士研究生。主要从事钢筋混凝土结构抗震性能的研究。

赵国藩 中国工程院院士, 教授, 博士生导师。主要从事工程结构可靠性、钢筋混凝土结构基本理论、高性能混凝土、纤维混凝土等方面的研究。