

文章编号: 1000-5013(2011)01-0092-04

锈蚀钢筋混凝土梁静承载力性能试验

曾志兴¹, 宋小雷^{2,3}

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;
2. 江苏省建筑科学研究院有限公司, 江苏 南京 210008;
3. 江苏省建筑工程质量检测中心有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 通过对 7 根钢筋混凝土梁的静载试验, 分析剪跨比和钢筋锈蚀率对试验梁的承载力、荷载-挠度曲线、钢筋和混凝土应变变化等力学性能的影响。结果表明, 剪跨比仍是决定钢筋锈蚀梁性能的主要因素, 钢筋锈蚀程度并不改变其破坏类型, 但钢筋锈蚀严重时会出现由适筋破坏向少筋破坏转变的现象。随着钢筋锈蚀程度的增加, 钢筋混凝土梁的承载力和整体刚度均明显下降, 屈强比增大, 使构件的安全性降低。钢筋锈蚀后, 钢筋混凝土梁的正截面平均应变不再符合平截面假定, 而是存在钢筋应变滞后的现象。此外, 钢筋锈蚀后, 钢筋与混凝土之间的协同工作能力下降。根据试验结果, 拟合出钢筋锈蚀率为 6%~15% 范围内锈蚀钢筋混凝土梁的抗弯承载力计算表达式。

关键词: 钢筋混凝土梁; 锈蚀率; 抗弯承载力; 剪跨比

中图分类号: TU 375.1; TU 312

文献标识码: A

钢筋混凝土梁是钢筋混凝土结构中的重要受力构件, 研究钢筋混凝土梁中的钢筋锈蚀以后对其各项性能的影响, 是钢筋混凝土耐久性研究中十分重要的问题。钢筋混凝土结构耐久性不足所造成的结构破坏、经济损失等问题, 日益引起世界各国土木工程界的高度重视, 相关的研究已经成为当今工程研究的热点。钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土构件耐久性降低的重要因素之一^[1], 对锈蚀后钢筋混凝土梁的承载力性能的研究, 是钢筋混凝土结构耐久性研究中的重要内容之一。锈蚀钢筋混凝土构件的承载力计算是混凝土结构耐久性评估的关键问题。国内外对锈蚀构件的承载力研究刚刚起步, 所采用的研究方法主要是试验研究和有限元分析。本文通过对 7 根纵筋和箍筋同时锈蚀后的钢筋混凝土梁进行静承载力试验, 并给出其承载力计算表达式。

1 试验概况

1.1 试验材料

混凝土强度等级为 C30, 采用 P. O. 42.5 普通硅酸盐水泥, 细骨料为细度模数为 2.9, 堆积密度为 $1.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的中砂, 粗骨料为最大粒径 20 mm 的碎石。各材料用量经调试配制后配合比为水泥: 水: 砂: 碎石 = 1: 1.54: 3.12: 0.5, 实际测得混凝土抗压强度标准值为 43.3 MPa。纵筋采用直径为 12 mm 的 II 级钢筋, 测得其屈服强度为 497.5 MPa; 箍筋采用直径为 6 mm 的 I 级钢筋, 测得其屈服强度为 337.8 MPa。

1.2 试件主要参数

试验采用 7 根相同几何尺寸和配筋的矩形截面简支梁, 其中 2 根为钢筋未锈蚀对比梁。按照国家标准 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》的要求^[2], 试件设计为适筋梁, 截面为 100 mm×120 mm, 梁长为 640 mm; 采用 C30 强度等级混凝土, 梁底受力主筋为 2Φ12; 箍筋为 Φ6@70 mm; 试验采用 3 点加

收稿日期: 2009-09-12

通信作者: 曾志兴(1967-), 男, 教授, 主要从事混凝土结构耐久性的研究。E-mail: zhixing@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金项目(E0740009); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(07FJRC05); 福建省闽港人才合作项目(24200701)

载方案,跨中为纯弯段,剪跨比 λ 为 1.2 和 1.8. 试验梁的加载示意,如图 1 所示.

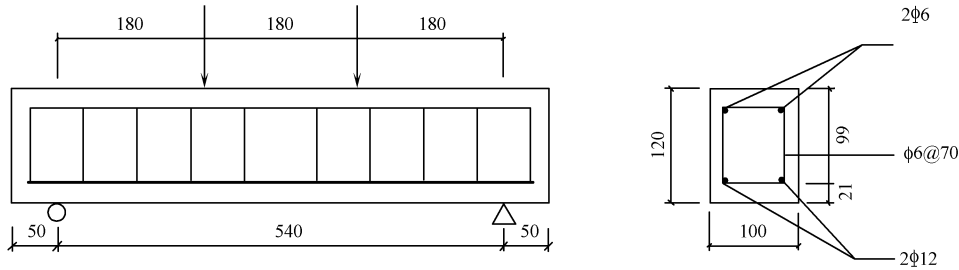


图 1 试验梁加载示意图(单位:mm)

Fig.1 Load setup of experimental beams(unit:mm)

1.3 电化学快速锈蚀试验

将钢筋混凝土试件浸泡在 3%~5% 的 NaCl 溶液中若干天后,把连接钢筋的导线与恒定直流电源的阳极相接,而直流电源的阴极则与溶液中的不锈钢片相接,通过 NaCl 溶液形成回路,电解消耗阳极的钢筋. 为了使纵筋和箍筋同时锈蚀,在试件上部用一根细钢筋与全部的箍筋焊接相连并弯出构件表面,方便和导线连接,纵筋和箍筋用钢丝绑扎后轻微电焊,从而使得纵筋和箍筋同时通电锈蚀.

钢筋电化学快速锈蚀试验控制方法^[3],采用电化学理论中的法拉第(Faraday)定律. 因此,根据该定律可知,钢筋锈蚀率的大小可以通过调整电流密度和通电时间进行控制. 试验设计的试件为钢筋中等或严重锈蚀,钢筋锈蚀率(ρ_s)控制在 6%~15% 范围内,等效电流密度大小为 $15\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$.

2 试验结果及分析

2.1 承载力及破坏形态

试验主要结果,如表 1 所示. 表 1 中: λ 为剪跨比, P_y,P_u 分别为试件的屈服荷载和极限荷载.

由表 1 可知,当 $\lambda=1.2$ 时,钢筋锈蚀试件 JA1-1,JA2-1 的极限承载力分别比钢筋未锈蚀对比梁 JA0-1 的极限承载力下降 16.5%,24.7%;当 $\lambda=1.8$ 时,锈蚀梁 JA1-2,JA2-2 的极限承载力分别对比梁 JA0-2 的极限承载力下降了 10.5%,17.9%. 即当剪跨比不同时,试验梁的极限承载力均随着钢筋锈蚀程度的增大而大幅降低. 此外,钢筋锈蚀越严重的试件,其屈强比 P_y/P_u 越大,有的甚至接近于 1,这表明钢筋锈蚀后钢筋混凝土梁的受力性能变差,危险性增大.

试验中的 7 根钢筋锈蚀试验梁的破坏形态随剪跨比 λ 的不同而不同. $\lambda=1.2$ 的试件均发生剪切破坏; $\lambda=1.8$ 的试件(除 JA2-3 因钢筋锈蚀严重发生端部锚固破坏外)均发生了弯曲破坏;但试验同时发现,钢筋锈蚀严重的试件发生了类似少筋梁破坏的特征. 这表明,剪跨比仍是决定钢筋锈蚀梁的主要因素,钢筋锈蚀程度并不改变其破坏类型,但钢筋锈蚀严重时,会出现由通筋破坏向少筋破坏转变的现象.

表 1 主要试验结果

Tab.1 Main results of test

| 试件编号 | λ | 锈蚀程度 | P_y/kN | P_u/kN | $P_y\cdot P_u^{-1}/\%$ | 裂缝特征及破坏形态 |
|-------|-----------|------|-----------------|-----------------|------------------------|--------------------|
| JA0-1 | 1.2 | 未锈蚀 | 150.2 | 165.7 | 90.5 | 剪跨段斜裂缝迅速变宽,斜压破坏 |
| JA0-2 | 1.8 | 未锈蚀 | 96.1 | 101.2 | 95.0 | 出现典型弯剪斜裂缝,弯曲破坏 |
| JA1-1 | 1.2 | 中度锈蚀 | 127.2 | 138.3 | 92.0 | 斜裂缝明显,偏向剪压破坏特征 |
| JA1-2 | 1.8 | 中度锈蚀 | 86.9 | 90.6 | 95.9 | 有贯穿斜裂缝,弯曲破坏 |
| JA2-1 | 1.2 | 严重锈蚀 | 119.4 | 124.8 | 95.6 | 剪跨段斜裂缝迅速扩展,斜压破坏 |
| JA2-2 | 1.8 | 严重锈蚀 | 82.1 | 83.1 | 98.8 | 跨中 1 条垂直缝迅速扩大,弯曲破坏 |
| JA2-3 | 1.8 | 严重锈蚀 | 61.5 | 63.0 | 97.6 | 端部钢筋突然拔出,锚固破坏 |

2.2 荷载-跨中挠度试验

荷载-跨中挠度曲线反映构件受力发展和刚度变化等特征,是判断构件受力性能的一个重要方面. 通过测量荷载作用和跨中挠度大小,可得出各试件的跨中挠度(f)随荷载(P)变化曲线,如图 2 所示.

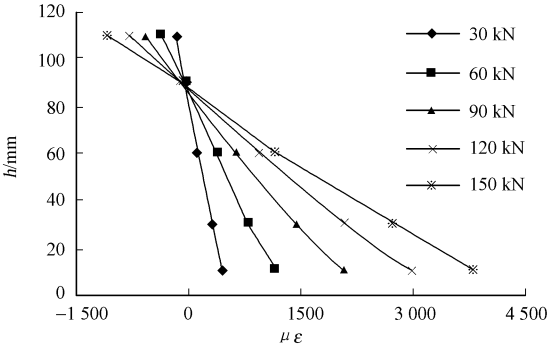
从图 2 可知,各试件的 P - f 曲线均经历了上升、屈服和破坏 3 个阶段. 对比梁的 P - f 曲线有明显的屈服平台和增强阶段,而钢筋锈蚀试件的 P - f 曲线达到屈服后跨中位移即迅速增大,没有明显的增强

阶段. 比较各试件 $P-f$ 曲线可以看出,随着钢筋锈蚀程度的增加,各曲线的斜率有逐渐减小的趋势. 由此可见,钢筋锈蚀后钢筋混凝土梁的受力性能和刚度都有不同程度的下降.

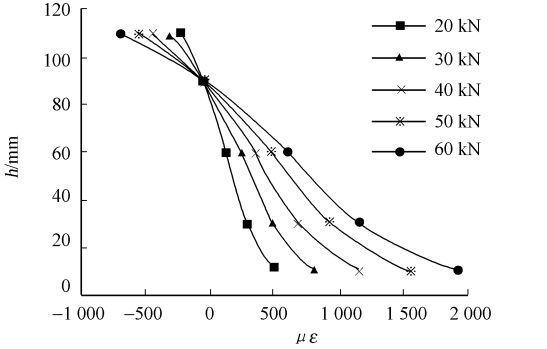
2.3 混凝土截面应变分布特征

现行规范中,钢筋混凝土受弯构件的理论计算均以平截面假定为基本前提. 试验通过设置在梁侧面沿高度方向的应变片,来测量在不同荷载作用下的混凝土应变,以判断钢筋锈蚀后的钢筋混凝土试验梁的正截面平均应变变化特征. 钢筋未锈蚀试件 JA0-1 及钢筋严重锈蚀试件 JA2-3 的正截面混凝土应变图,如图 3 所示. 图 3 中: h 为截面高度, ϵ 为应变.

由图 3 中可以看出,对于正常完好的钢筋混凝土梁,其正截面平均应变基本符合平截面假定. 锈蚀后的钢筋混凝土梁 JA2-3 的正截面平均应变不再符合平截面假定,而存在钢筋应变滞后的现象,即混凝土与钢筋的应变变化不再保持一致,而是变化速率大于钢筋应变变化. 分析其原因可能是,钢筋锈蚀后,钢筋与混凝土之间的粘结性能下降,导致受力过程中钢筋与混凝土的协同工作能力下降,钢筋与混凝土之间发生了相对较大的位移,从而使混凝土应变增长速率比钢筋应变增长较快.



(a) JA0-1



(b) JA2-3

图 3 试件的正截面应变图
Fig. 3 Strain of normal cross-section of beams

2.4 钢筋应变发展及分布特征

钢筋未锈蚀完好梁 JA0-2 和钢筋锈蚀梁 JA1-2 的纵筋应变($\mu\epsilon$)随荷载(P)变化的发展曲线,如图 4 所示. 由图 4 可以看出,钢筋未锈蚀时,钢筋的荷载-应变曲线具有明显的屈服平台和增强阶段;而钢筋锈蚀后,纵筋应变随荷载的发展速率明显增大,钢筋屈服后即应变即迅速增大至破坏,曲线没有明显的增强阶段. 由此可见,钢筋锈蚀的力学性能明显降低.

3 抗弯承载力模型

研究表明,随着钢筋锈蚀率的增加,钢筋混凝土梁的抗弯承载力均有不同程度的下降. 一般认为,其原因主要有 3 个方面:钢筋锈蚀引起的钢筋截面积减少和屈服强度的减小,以及钢筋与混凝土的粘结力下降而导致钢筋与混凝土协同工作系数的降低. 此外,钢筋锈蚀膨胀使混凝土内部产生约束应力,使受拉区混凝土的轴向抗拉强度降低,锈蚀严重的甚至出现顺筋裂缝,从而使构件产生结构损伤. 随着荷载的增大,试件内部的损伤累积也逐渐增大,最终导致构件承载力急剧下降,过早地发生破坏.

在参考相关研究^[4-6]的前提下,根据试验所得相关数据并考虑锈蚀后钢筋混凝土梁极限承载力的综合折减系数,得出钢筋锈蚀率为 6%~15% 范围内锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算表达式. 即

$$M_{su} = k_s M_{u,0},$$

式中: $M_{u,0}$ 为未锈蚀的钢筋混凝土梁的抗弯承载力; η_s 为钢筋锈蚀率; k_s 为考虑钢筋锈蚀后的梁抗弯承

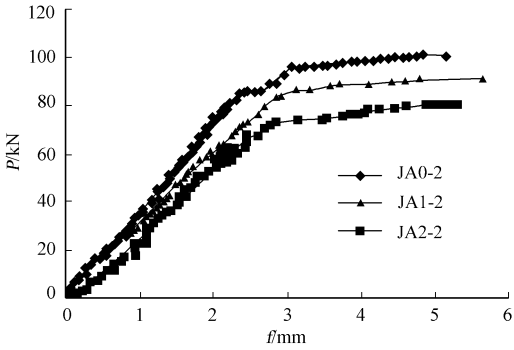


图 2 试件的荷载-跨中挠度曲线
Fig. 2 Curves of load to mid-span displacement

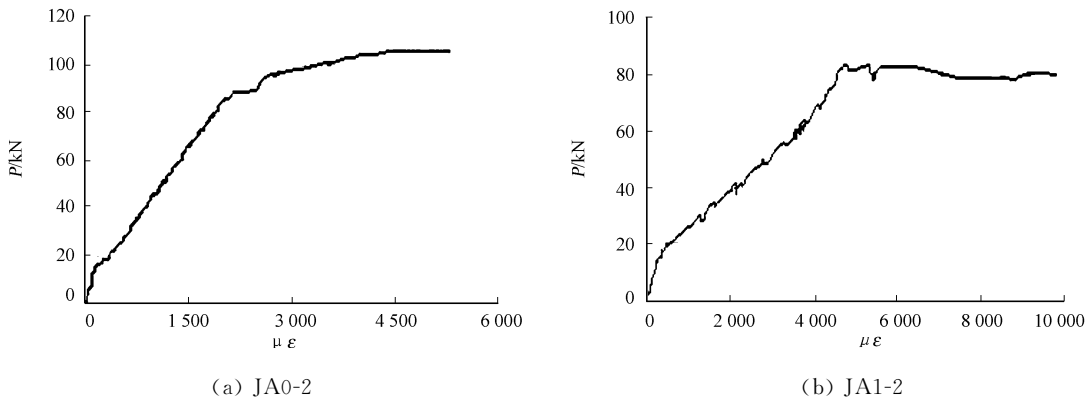


图 4 试件的纵筋应变随荷载的变化曲线

Fig. 4 Curves of load to strain of longitudinal bars

载力的综合折减系数,当 $6 \leq \eta_s \leq 12$ 时, $k_s = 1.003\ 4 - 0.015\ 9\ \eta_s$; 当 $12 \leq \eta_s \leq 15$ 时, $k_s \leq 0.7$.

4 结束语

通过对钢筋混凝土梁的静载试验,给出锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算表达式. 试验结果表明,随着钢筋锈蚀率的增大,试验梁的极限承载力和刚度均明显降低,屈强比增大,钢筋与混凝土正截面平均应变不再符合平截面假定.

参考文献:

[1] 陈肇元. 土建结构工程的安全性及耐久性[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003: 1-44.

[2] 中华人民共和国建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 1-60.

[3] 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): 28-30.

[4] 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): 9-12.

[5] 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.

[6] 曾志兴, 宋小雷, 孙艳秋. 钢纤维陶粒轻骨料混凝土受拉性能试验[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 208-210.

Experimental Investigation on Static Mechanical Behavior of Concrete Beams with Corroded Reinforcement

ZENG Zhi-xing¹, SONG Xiao-lei^{2,3}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Jiangsu Research Institute of Building Science Co. Ltd., Nanjing 210008, China;

3. Jiangsu Testing Center For Quality of Construction Engineering Co. Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: Based on the static load test of 7 RC beams, the influence of the shear span ratio steel corrosion rate on the beam load carrying capacity, load-deflection curve, reinforced bars and concrete strain, is analyzed. The test results indicate: the shear span ratio is still the main factor influencing the properties of beams with corroded reinforcement; the steel corrosion rate doesn't change the failure modes, but the serious corrosion can turn the beam from the balanced reinforcement to the under reinforcement. With increasing the steel corrosion rate, the load carrying capacity and stiffness of beams reduce obviously, the ratio of yield strength to ultimate strength increases, the average strain of steel bars and concrete no longer meets the plane assumption. According to the experimental results, the calculation formulae of the flexural load carrying capacity of the beams with 6%~15% steel corrosion ratio is fitted out.

Keywords: reinforced concrete beams; corrosion ratio; flexural load carrying capacity; shear span ratio