

不同应力状态下钢筋混凝土梁 加速腐蚀试验研究^{*}

吴锋^{1,2},张章²,邱松²

(1.上海交通大学土木工程系,上海200240;2.中交上海三航科学研究院有限公司,上海200032)

摘要:开展了不同应力状态下钢筋混凝土梁电解液加速腐蚀试验,研究了加速腐蚀试验中通电时间、钢筋腐蚀率和荷载水平等外界条件对试验构件力学性能的影响,分析了钢筋锈蚀过程中梁截面应变变化和锈蚀裂缝产生情况,为进一步开展应力状态下钢筋混凝土梁的研究提供了试验参考。

关键词:应力状态;电解液加速腐蚀;钢筋混凝土
 中图分类号:TU 528.7
 文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0025-06

Experimental study on electrolyte accelerated corrosion for reinforced concrete beams under stress states

 $WU\ Feng^{1,2}$, ZHANG $Zhang^2$, QIU $Song^2$

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: This paper presents results and discussions on an experimental study conducted to relate the influence of external conditions, such as the corrosion rate, the conduction time and the level of sustained load, on the mechanical properties of the corrosive beams under stress states that corroded by electrolyte accelerated corrosion test method. The strain for the cross section and the cracking development of corroded beams in the process of reinforcement corrosion are analyzed to provide a reference for further study of reinforced concrete beams supporting varied loads.

Key words: stress state; electrolyte accelerated corrosion; reinforced concrete

随着混凝土结构使用年限的增加,钢筋会出 现锈蚀现象^[1]。钢筋锈蚀不仅使有效截面减少、弹 性模量和屈服强度降低,而且会使其与混凝土的 粘结性能发生退化^[2]。从国内外对水利工程、海港 工程、路桥工程、工业建筑、民用建筑等调查研 究结果来看^[3-5],混凝土中钢筋锈蚀导致混凝土结 构的过早破坏,是当今影响混凝土结构耐久性的 首要原因。当钢筋锈蚀量累积到一定的程度时, 保护层将由于锈胀力的作用而沿着钢筋纵向开 裂。混凝土由于钢筋锈胀导致开裂的机理及对结构 性能的影响研究目前已经取得了不少的进展^[6-7]。

开展锈蚀钢筋混凝土构件受力特征研究是钢筋混凝土结构性能退化评估的基础,目前研究锈蚀钢筋混凝土构件承载力所采用的方法主要是加速腐蚀试验研究。本文将通过加速腐蚀方法,开展了不同外荷载作用下钢筋混凝土梁的锈蚀试验研究,分别研究了无应力下不同通电时间、相同通电时间下不同应力水平、相同应力水平下不同通电时间等3种工况对试验梁性能退化的影响,以及钢筋腐蚀过程中梁截面的应变变化和锈蚀裂缝

收稿日期:2012-05-02 *基金项目:交通部西部交通建设科技项目基金(2009 328 521 076) 作者简介:吴锋(1978—),男,硕士,高级工程师,从事港工结构研究。 的发展状况,同时也分析了钢筋腐蚀率和应力水 平对钢筋混凝土梁挠度变形、裂缝特性以及承载 力的影响。

1 试验设计

设计的10根试验梁轴心长度1 900 mm,截面 高200 mm,宽120 mm,混凝土强度等级为C30, 混凝土保护层厚度为28 mm;纵向受拉钢筋单层布 置,采用2根HRB335级直径为14 mm的热轧钢筋, 纵筋锚固长度为180 mm,其中伸入支座70 mm, 在支座处上弯110 mm。绑扎钢筋笼前,将纵向受 拉钢筋进行除锈称重并编号。由于本研究主要关 注纵向受拉钢筋锈蚀后性能,因此要将受拉钢筋 与箍筋绝缘。绑扎钢筋时先按照箍筋间距在纵筋 上标记与箍筋接触点,并用绝缘胶带在接触点附 近缠绕几圈然后绑扎,绑扎后在接触点涂抹环氧 树脂。

表1列出了试验梁的钢筋目标锈蚀率,以及相 应的外荷载的水平,其中M_{cr}为试验梁开裂弯矩, 试验前根据截面的有效惯性矩法计算。构件分别 考虑了无应力工况下,不同通电时间对试验梁性 能退化的影响;在相同通电时间下,不同应力水 平对试件梁性能退化的影响;以及相同应力水平 下,不同通电时间对试件梁性能退化的影响。

组号	梁编号	应力水平	目标腐蚀率/%
	B-10	0	5
S-1	В-8	$0.5 M_{ m cr}$	5
	B-7	$0.7 M_{ m cr}$	5
	B-1	0	10
S-2	B-4	$0.5 M_{ m cr}$	10
	В-2	$0.7 M_{ m cr}$	10
	В-3	0	7.5
S-3	В-5	$0.5 M_{ m cr}$	7.5
	В-6	$0.7 M_{ m cr}$	7.5
S-4	В-9	0	0

表1 试验梁应力水平及目标锈蚀率

试验采用电解液加速锈蚀法进行梁内纵向 钢筋的快速锈蚀。具体方法为:将试验梁浸泡在 5%NaCl溶液的腐蚀槽中72 h,使液面高度基本淹 没纵筋。将连接纵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 板相连接,通过NaCl溶液形成回路,使阳极的钢 筋锈蚀。根据法拉第定律,通过控制电流大小和通 电时间的长短,可以控制梁内钢筋的锈蚀量。

堆载方案如图1所示,每3根试件梁作为一 组,在池中同时放置,端部由支座垫起,支座可 由三角铁焊制。只有2根梁受载,堆载板上放置砝 码。为了使梁下部在受力状态下不产生裂缝,减 少裂缝对实验结果的影响,将2个试件梁上分配得 到的荷载造成的弯矩值,分别设定为开裂弯矩计 算值的50%和70%。



图1 通电过程应变检测方案

2 锈蚀过程中梁截面应变分析

为了在试验梁通电腐蚀阶段研究锈蚀梁截面 的应变变化情况,对混凝土梁的截面应变进行持 续恒定荷载下的应变监测,每根梁布置2组应变 片,每组5片上下对称布置,应变片粘贴方案如图 2所示。在持续通电16 d后,得到通电过程中纯弯 段截面应变如图3所示。







随着通电时间的增加,试验梁受拉区和受压 区的截面应变均逐渐增大,每根梁在钢筋位置附 近的混凝土应变都有突变,从图3可以看出,梁 的截面应变不符合平截面假定。钢筋附近的混凝 土应变几乎都大于梁的上下端部应变,这是由于 粘结应力的存在使钢筋及其附近的混凝土能够协 同作用,将钢筋及其周围包裹的混凝土作为统一 的研究对象,由于其刚度大,分配到了更大的应 力,造成应变也更大,而上下端部的混凝土应变 必然出现滞后现象。与以往研究较多的钢筋应变 滞后现象不同,这是在低应力水平下的混凝土应 变滞后现象。两根试验梁所承受荷载分别为开裂 荷载计算值的50%和70%,即使钢筋锈蚀量达到一 定程度,在低水平静荷载作用下,粘结应力处于 累积的阶段,粘结滑移尚未较大程度发生。

粘结强度损失是不可逆的过程,在已发生的 粘结滑移幅度内,粘结强度几乎完全丧失。在梁 快速锈蚀之后,利用千斤顶并采用相同加载方法 和相近的荷载水平对锈蚀梁施加低水平静荷载, 混凝土应变如图4所示。



图4 千斤顶作用下试验梁纯弯段截面应变

可见,混凝土变形前后基本保持平面。在 微量的粘结滑移发生后,钢筋承受的应力较为平 均,变形也比较均匀,因此可以近似认为混凝土 与钢筋变形一致,在计算受弯构件开裂荷载的基 本假定中,平截面假定仍然适用。

通电过程中纯弯段截面应变随时间变化曲线 如图5所示,从图中可以看出随着通电时间的延 长,钢筋锈蚀增加,梁截面的应变逐渐增加。

















3 锈蚀裂缝分析

在钢筋锈蚀的同时,锈蚀物体积膨胀产生 锈胀应力,锈胀应力随锈蚀率的增大而增大,当 锈胀应力达到并超过底面或侧面混凝土的抗拉强 度时,混凝土开裂。由于底面和侧面的保护层厚 度相同,裂缝随机出现在梁底面和侧面。在经过 加速腐蚀试验后,可以清楚地观察到,铁锈随溶 液从混凝土孔隙中溢出,将锈蚀梁混凝土染成黄 色,而裂缝界面之外的混凝土则相对干净。每根 锈蚀梁都有顺筋锈胀裂缝,大部分裂缝贯通梁全 长,利用裂缝测宽仪测出其中最大锈胀裂缝宽度 达到2.7 mm。大部分锈蚀的试验梁每根钢筋所对 应的锈胀裂缝有且仅有1条,如图6所示。仅有1根 梁的某根纵筋在梁纵向约500 mm范围内存在2条锈 胀裂缝,分别位于梁侧和梁底,如图7所示。这是 由于钢筋在此区段出现比较严重的腐蚀,出现第1 条锈胀裂缝后,锈蚀物没有充分从此裂缝界面流 出,累积了更多的铁锈后,出现第2条裂缝。需要 注意的是,这2条裂缝的开裂原因是不一样的:第 1条裂缝是典型的锈胀力导致的混凝土受拉开裂; 而第2条裂缝是由于第1条裂缝宽度持续增大导致 的弯折断裂。因此当利用裂缝宽度评估锈蚀率 时, 仅需考虑相对更大的裂缝宽度而不必进行宽 度的叠加。



图6 1根钢筋对应1条裂缝



图7 同一纵筋附近出现2条裂缝

4 锈蚀梁承载力分析

对10根不同锈蚀程度的试验梁分别进行了

抗弯承载力试验研究,由于在前期设计中钢筋两 端均进行了向上弯起锚固,试验梁的破坏均未 发生两端锚固滑移破坏现象,最终破坏形式均 为钢筋拉断破坏,其荷载与跨中挠度曲线如图 8所示。从图中可以看出,即使在荷载比较小的 时候,锈蚀梁的荷载挠度曲线也呈现明显的非线 性,锈蚀后梁的破坏是突然的,破坏前没有任何 征兆。



通过力学性能试验得到了不同荷载水平下不 同锈蚀率的梁开裂弯矩与破坏弯矩,并在试验后 对受力钢筋进行了实际锈蚀率的测试,与目标锈 蚀率进行对比,如表2所示。

表2 试验梁锈蚀率以及荷载试验结果

编号	荷载水平/%	实际锈蚀率/%	开裂荷载/kN	破坏荷载/kN
B-1	0	6.64	10.3	64.5
В-2	70	8.57	9.0	59.1
В-3	70	6.19	11.2	62.5
B-4	50	8.64	9.7	62.0
В-5	0	6.62	10.7	55.2
В-6	50	6.61	9.4	65.0
B-7	70	4.55	11.3	65.4
В-8	50	4.09	9.6	65.9
B-9	0	0.63	11.3	69.7
B-10	0	4.62	9.1	65.7

以不腐蚀梁的开裂荷载值为标准梁,将锈蚀 梁与标准梁的开裂荷载的比值定义为开裂退化系 数,各荷载水平下开裂退化系数与锈蚀率的关系 如图9所示。

第1期



图9 各荷载水平下承载力退化系数与锈蚀率的关系

从图9可以看出,随着锈蚀率的增加,试验梁 的开裂荷载与极限荷载试验值呈退化趋势。但承 载力与持续外荷载水平的关系却不是非常明显。 这是由于本试验中为防止加载过程中裂缝的产生 对试验结果产生影响,外荷载水平比较低,使 得产生的影响比较微小。持续外荷载水平与锈蚀 率、抗弯承载力三者的关系如图10所示。



图10 外荷载与锈蚀率、承载力的关系

当荷载水平不大(小于开裂荷载)时,可认 为外荷载对承载力没有直接影响。外荷载使受拉 区混凝土的微裂缝张开,氯离子、氧气和水等有 害物质更容易进入钢筋界面。持续的外荷载使微 裂缝随着锈蚀率的增大而持续扩张,进一步加快 了锈蚀的速率。

5 结论

通过3组不同应力状态下加速腐蚀钢筋混凝土

梁的试验结果可以看出,随着钢筋锈蚀程度的增 大,钢筋位置附近的梁截面应变都有突变,梁的 截面应变变化不再符合平截面假定。即使在荷载 比较小的时候,锈蚀梁的荷载挠度曲线也呈现明 显的非线性,锈蚀后的梁的破坏是突然的,破坏 前没有任何征兆。

采用通电方式的钢筋混凝土梁加速腐蚀试验 存在的问题,目标锈蚀率和实际锈蚀率存在一定 误差,其中由于箍筋的存在部分分担了主筋的锈 蚀,因此开展此类方法的锈蚀试验,需要进一步 做好箍筋和主筋的绝缘作用,以使得试验参数的 控制更加准确。

随着钢筋锈蚀率的增加,试验梁的抗弯承载 力呈退化趋势,由于本文试验中梁的外部荷载水 平比较小,承载力与外荷载之间的关系不是非常 明显。因此需要进一步开展持续高应力情况下钢 筋混凝土梁加速腐蚀试验研究。

参考文献:

- 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠性理论[M].北京:中 国建筑工业出版社,2000.
- [2] 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:工学版, 2002, 36(4): 352-256.
- [3] 王胜年,黄君哲.华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查 与结构耐久性分析[J].水运工程,2000(6):8-12.
- [4] 吴胜兴,吴瑾,王巧平,等.连云港西大堤钢筋混凝土 护栏锈裂破坏调查报告[R].南京:河海大学土木学院, 2001.
- [5] Torres-Acosta A A, Navarro-Gutierrez S, Teran-Guillen J. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams[J]. Engineering Structures, 2007 (29): 1 145–1 152.
- [6] S J Pantazopoulou, K D Papoulia. Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structure[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(4): 342–351.
- [7] Chen Dong, Mahadevan Sankaran. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation[J]. Cement Concrete and Composites, 2008, 30: 227-38.

2013 年