

文章编号:1673-9469(2009)03-0015-04

钢筋与混凝土耦合腐蚀 RC 梁性能研究

安新正^{1,2}, 易成², 王晓虹¹, 张结太¹

(1. 河北工程大学 土木学院, 河北 邯郸 056038; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要:在混凝土结构耐久性的诸多影响因素中, 钢筋与混凝土的耦合腐蚀已成为引起混凝土结构过早破坏的一个主要因素。基于不同腐蚀损伤水平条件下的 14 根简支钢筋混凝土梁抗弯试件的试验结果, 分析了混凝土与钢筋耦合腐蚀损伤后梁的基本性能。同时, 研究了耦合腐蚀对钢筋混凝土梁承载性能的影响, 提出了耦合损伤条件下, 钢筋混凝土梁抗弯承载力的一般评价方法, 为指导此类构件承载性能评价及后续加固设计提供技术参考。

关键词:钢筋混凝土梁; 耦合腐蚀; 抗弯承载力; 试验研究

中图分类号: TU746.2

文献标识码: A

Study on behavior of RC beam by reinforcement - concrete coupling corrosion

AN Xin-zheng^{1,2}, YI Cheng², WANG Xiao-hong¹, ZHANG Jie-tai¹

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China; 2. Laboratory of Coal Resources and Mine Safety, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In various factors that influence the concrete structure durability, coupling corrosion between reinforcement and concrete has become the important destructive factors in existing concrete structures. Based on the previous test results to 14 corroded RC beams under different corrosion level of concrete and steel bar, the performance of the corroded RC beam under the concrete - reinforcement coupling corrosion is studied. According to those results, estimate methods on flexural capacity under different concrete - reinforcement coupling corrosion are proposed. In this study, effective estimate methods are found out through experiment, which can provide technical reference new thought for flexural capacity evaluation and strengthening design in RC beams under the concrete - reinforcement coupling corrosion, and also have some theoretic guide for practice.

Key words: reinforced concrete beam (RC beam); reinforcement - concrete coupling corrosion; flexural capacity; experimental study

我国的工业建筑与民用建筑工程结构中, 钢筋混凝土结构所占的份额已超过 70%, 现已发展成为建筑结构的主要形式。长期以来, 由于广泛遭受到侵蚀性介质、冻融循环以及荷载的长期作用, 使得这些在役钢筋混凝土构件因自身材料的腐蚀损伤, 导致其承载性能随着时间的增长而不断劣化, 表现为承载力和刚度的逐渐减小, 可靠性降低^[1,2]。长期以来, 国内外学者也针对混凝土和混凝土中钢筋的腐蚀作用与机理及其影响因素和钢筋锈蚀对混凝土构件性能的影响进行了大量

的考证与试验研究, 取得了一些研究成果^[3-8], 但关于钢筋与混凝土二因素腐蚀所带来的耦合效应方面的研究较少。本文基于十四根具有不同材料损伤水平的钢筋混凝土梁的正截面抗弯试验结果, 进行了各腐蚀因素对梁抗弯性能的贡献以及耦合影响的试验研究, 提出了耦合腐蚀条件下钢筋混凝土结构的承载性能估算方法。期望为遭受耦合侵蚀钢筋混凝土构件的性能评估及后续加固设计提供技术参考。

收稿日期: 2009-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478077)

特约专稿

作者简介: 安新正(1963-), 男, 河南镇平人, 副教授, 博士, 从事工程检测、加固与理论方面的研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

本次试验共制作试件 15 根,编号依次为 L-1、L-2、…、L-15。其中,L-13 为抗弯性能对比试验梁,L-15 为混凝土强度对比梁(用于钻芯法取样确定混凝土强度)。梁截面尺寸为 $b \times h = 150\text{mm} \times 200\text{mm}$,梁长为 $L = 2\,200\text{mm}$ 。梁底部配筋为 2 ϕ 10 钢筋(I级),架立筋采用 2 ϕ 6(I级),箍筋采用 ϕ 6(I级)间距 200mm,保护层厚度 $C = 25\text{mm}$ 。经测试钢筋的屈服强度为 356MPa,试验梁具体尺寸和配筋见图 1。

混凝土配合比为水:水泥:细集料:粗集料:硫酸镁:氯化钙 = 0.66:1:2.38:3.85:0.05:0.05。养护方法:室内自然养护 28d。对除 L-13、L-15 外的各个试验梁均进行干-湿循环(浸泡于 3.5% 的硫酸镁溶液中 48h,然后自然风干 5d 为一个循环,共进行 10-30 个循环)腐蚀处理和直流电法钢筋快速腐蚀。

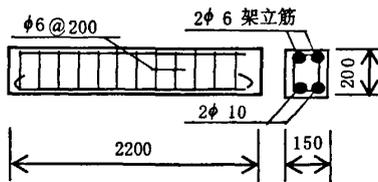


图1 截面尺寸与配筋

Fig.1 Details of test beams

1.2 腐蚀水平计算方法

钢筋及混凝土的腐蚀水平试验均安排在各梁正截面抗弯试验完成后进行。

混凝土强度降低水平以其强度降低的百分率来表示,即

$$\eta_c = \left| \frac{f_c - f_c^{(t)}}{f_c} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中 η_c 为混凝土强度损失水平(%); f_c 为无腐蚀时混凝土的抗压强度值(MPa); $f_c^{(t)}$ 为 t 时刻腐蚀后混凝土抗压强度实测值(MPa)。

钢筋锈蚀损失水平以其重量损失的百分率来表示,即

$$\rho_s = \left| \frac{m_0 - m_c^{(t)}}{m_0} \right| \times 100\% \quad (2)$$

式中 ρ_s - 钢筋重量损失率(%); m_0 - 实测锈蚀前钢筋的质量(g,精确到 0.1 g); $m_c^{(t)}$ - t 时刻除锈蚀

后钢筋的净质量(g,精确到 0.1g)。

1.3 抗弯性能试验及 η_c 、 ρ_s 计算

试验梁的正截面抗弯试验均采用简支的形式,简支的跨度为 2 000mm。试验时在简支梁的跨中位置施加一个集中荷载 F 。加载方案如下:

①估算梁的破坏荷载 P_{ug} 。

②每级施加荷载值 $F = P_i = 1/10 P_{ug}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), $n \in N$, 并且当荷载累积施加值 $P \geq \sum_{i=1}^n P_i = 0.9 P_{ug}$ 时,适当下调施加荷载值,在此取 $F = P'_i = 1/20 P_{ug}$ 。

同时测量每级荷载下的各试验梁的跨中挠曲变形,直到试件最终破坏为止。

对于已完成抗弯试验的全部试件选取其较完整的部位进行钻芯取样,并依据《钻芯法检测混凝土强度技术规程》^[9]和《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[10]求得腐蚀后混凝土的实际强度,然后按式(1)计算混凝土强度损失水平 η_c 。最后对完成抗弯、钻芯取样的全部试件进行破碎并取出受拉钢筋,清理附着在钢筋上的杂质与铁锈,然后由式(2)计算钢筋重量损失率 ρ_s ^[11],试验结果见表 1。

表 1 腐蚀钢筋混凝土梁试验数据

Tab.1 The test results for corrosion RC beams

试件 编号	M_u /kN.m	破坏特征	η_c /%	ρ_s /%
L-1	5.82	延性破坏	2.6	2.35
L-2	4.32	延性破坏	7.6	3.35
L-3	4.84	延性破坏	12.3	9.78
L-4	1.37	钢筋滑移	7.2	30.06
L-5	2.48	延性破坏	17.1	5.37
L-6	5.61	延性破坏	2.7	2.23
L-7	4.53	延性破坏	6.5	5.34
L-8	3.73	延性破坏	10.6	5.35
L-9	3.12	钢筋拉断	2.5	15.12
L-10	1.56	钢筋滑移	20.3	15.14
L-11	2.73	延性破坏	4.5	15.13
L-12	2.57	钢筋滑移	6.3	15.12
L-13	6.36	延性破坏	0.0	0.00
L-14	0.83	钢筋滑移	36.6	3.01

2 试验结果分析

在图 2 的 A、B 两曲线图中分别给出了受拉钢筋腐蚀水平 $\rho_s = 5.34\% - 5.37\%$ 与 $\rho_s = 15.12\% - 15.14\%$ 时,试验梁的抗弯性能与对比梁 L-13 比较结果。从试验结果可以看出,腐蚀钢筋混凝土

梁在承载性能上的退化失效影响因素不仅仅只在于钢筋的锈蚀^[12],混凝土强度的腐蚀退化损伤也是不可忽视的一个重要因素,钢筋材料和混凝土材料的状态在钢筋混凝土构件承载性能中扮演着相互耦合和相互依赖的角色。

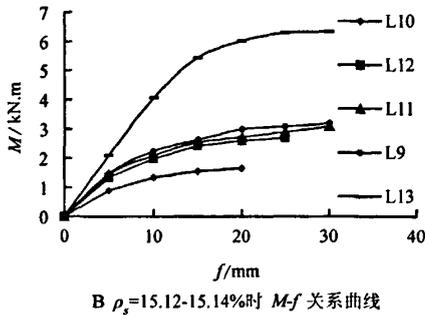
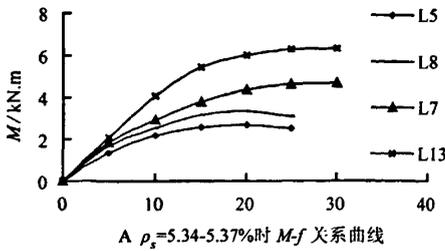


图2荷载-挠度关系曲线
Fig.2 Load-deflection curve

在 ρ_s 相近情况下,梁的承载性能主要受 η_c 控制。当 ρ_s 相近时且没有达到临界值时(引起混凝土顺筋开裂时的 ρ_s 值),随着 η_c 的逐渐增大,梁的整体刚度在逐渐减小,破坏形态也逐渐向钢筋滑脱的脆性破坏方向过度。同时,图2的A图与B图都可以清楚地看出钢筋锈蚀率 ρ_s 从 $\rho_s = 5.34\%$ 向 $\rho_s = 15.14\%$ 过渡过程中各试验梁刚度的变化趋势。

当 ρ_s 和 η_c 都较小时(如 L1、L2、L6),试件的破坏特征和无损伤梁试件 L13 几乎一样,破坏形式主要表现为延性破坏,只是由于材料的轻微损伤带来了承载性能上的一定损失。但试件随着损伤水平 ρ_s 的增大,虽说 η_c 还较小(如 $\eta_c = 4.5 - 6.3\%$),对试件的承载性能和破坏形态来说, ρ_s 就表现出较强的影响。当 ρ_s 大于 15.10% 时,试件承载性能明显有所下降,破坏为钢筋滑移或拉断,呈现出明显的非线性性质和脆性破坏性质。比较试验结果可以发现,当 $\rho_s = 30.06\%$,而 η_c 还较小(L4)时,试件的承载性能出现陡降,表现为钢筋滑移拔出的锚固破坏特征,试验梁侧面裂缝数量只

有 3 条,只有无腐蚀梁 L13 的一半。同时,试验梁的承载能力与 L13 相比,也损失了大约 78.5%,其脆性破坏特征表现是十分明显的。而当 $\eta_c = 36.6\%$, $\rho_s = 3.01\%$ 时(如试验梁 L14),混凝土的强度损失已经是相当严重,虽说钢筋的锈蚀还比较小,与 L13 相比,其承载能力损失已很显著(大约损失 63%),表观裂缝比较稀少(只有 2 条),其破坏表现为明显的脆性特征,梁的一端部有明显的钢筋滑移脱粘现象发生。

总之,各损伤因素的耦合作用对混凝土保护层的开裂以及钢筋混凝土的粘结损伤都有明显的加速作用。主要表现为随着混凝土材料损伤的逐步加剧,其弹性模量和抗拉强度指标也随之大幅度降低。随着侵蚀损伤的加剧,混凝土对钢筋表面的握裹面积以及握裹的强度都随之逐渐减小。同时,钢筋的锈蚀又加速了钢筋与混凝土化学粘结性能的退化,从而导致试验梁强度与刚度的明显下降。材料损伤的耦合作用直接降低了混凝土保护层开裂时钢筋锈蚀率的门槛值,是引起混凝土结构过早破坏不可忽视的重要因素。

3 腐蚀 RC 梁承载力估算

由于在侵蚀环境中,服役钢筋混凝土梁通常情况下,既有混凝土材料的腐蚀损伤,又有钢筋的锈蚀损伤,在估算其承载性能时,要依据实际检测情况而定。当所发生的材料损伤为 ρ_s 和 η_c 共存时,应当考虑两者之间的耦合作用对梁承载性能的影响。否则梁的承载力可按单项损伤进行估算。估算方法如下:

(1)当 $\rho_s \leq 1.2\%$ 且 $\eta_c \leq 6.5\%$ 时。此时可以不考虑腐蚀对钢筋和混凝土材料性能的影响,在计算梁抗弯承载力时,用腐蚀后实际的钢筋面积替代公式中的钢筋面积,混凝土强度采用实测强度并依照文献[13]按无腐蚀梁进行抗弯承载力计算即可。

(2)当 $\rho_s > 15\%$ 或 $\eta_c > 36\%$ 时。试验研究表明,此时由于钢筋和混凝土的腐蚀都较为严重,大部分梁底部已经产生严重的顺筋开裂,此时的混凝土梁在承受一较小荷载值时,钢筋与混凝土上的粘结与咬合作用就可能发生破坏,从而产生较大的相对滑动,此时平截面而假定的适应程度较差,并且试件腐蚀后的承载性能不具有连续性。此时的梁若端部锚固力不足,就会导致其承载性能的突然丧失。假若耦合腐蚀后钢筋混凝土梁的端部有

足够的锚固力存在,其承载能力的可参照无粘结预应力混凝土梁的计算方法进行估算。

(3)当 $6.5\% < \rho_s < 15\%$ 且 $6.5\% < \eta_c < 36\%$ 时,由于钢筋腐蚀后屈服强度有所降低,在此借鉴文献[14]给出的锈蚀钢筋的名义屈服强度 f_{ym} ,即

$$f_{ym} = f_y(1 - 1.077\rho_s) \quad (3)$$

式中 f_y - 钢筋的设计屈服强度(MPa); f_{ym} - 锈蚀钢筋的名义屈服强度(MPa)。

设受拉钢筋无锈蚀时的有效截面面积为 A_s ,考虑到受拉钢筋的锈蚀,不但导致其有效截面面积的减少,同时由于锈蚀的不均匀性,在计算腐蚀后受拉钢筋的面积 A_m 时应进行适当的折减,可按下式计算

$$A_m = A_s(1 - 1.051\rho_s) \quad (4)$$

对梁中受到腐蚀的混凝土材料来说,强度的损失也会带来混凝土与钢筋接触强度的软化,产生较大的相对滑移效应。混凝土强度取鉴定时刻的实际强度值,并对其考虑适当的折减,在此建议折减系数取 0.95。

$$f_c^t = 0.96f_c^i \quad (5)$$

式中 f_c^i - 推定的混凝土设计抗压强度值(MPa); f_c^t - t 时刻测定的混凝土抗压强度值(MPa)。

此时,平截面假定仍然成立。按照以上提供的腐蚀后的钢筋与混凝土的材料性能,参照文献[11]的方法计算耦合腐蚀后的混凝土梁的名义承载力 M_{um} 。然后再考虑耦合损伤的影响,对 M_{um} 进行适当的折减。折减可按下式进行

$$M_u = (1 - k)M_{um} \quad (6)$$

式(6)中 k 按下式取值

$$k = -0.005 + 3.733\rho_s + 0.998\eta_c \quad (7)$$

4 结论

1)钢筋的锈蚀损伤与混凝土的腐蚀损失对钢筋混凝土梁的作用并不是简单的叠加作用,而是相互影响和耦合的。就其对腐蚀梁承载性能的影响水平来说,当钢筋材料腐蚀水平较低时,混凝土强度的损失水平就对梁的性能起主导作用,此时的承载力失效主要是由于混凝土材料因腐蚀而导致的强度不足,我们称之为混凝土材料失效破坏模式。而当钢筋锈蚀较为严重,产生了较大的顺筋裂缝时,即使混凝土强度损失水平较小,梁的承载性能也会因钢筋与混凝土之间的黏结失效而失

效,在此称之为粘结失效破坏模式。耦合腐蚀对梁的承载性能有着明显的不利作用,它加速了混凝土梁的脆性破坏进程。

2)提出了基于不同耦合腐蚀水平条件下,在役腐蚀钢筋混凝土梁抗弯承载性能的估算方法,估算值与试验结果有较好的吻合,可为腐蚀钢筋混凝土构件的承载力评估提供参考。

3)鉴于本文在耦合侵蚀作用下钢筋混凝土梁的试验数据还相对较少,统计结果可能会存在一定的偏差,因此对于耦合侵蚀作用下的钢筋混凝土构件的破坏形态,承载性能的估算方法仍有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] MANGANT PRITPAL S, ELGANT MAHAMOUND S. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1): 149 - 158.
- [2] 惠云玲,李荣,林志伸,等.本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J].工业建筑,1997,27(6):15-18.
- [3] 惠云玲.混凝土结构中钢筋锈蚀程度评估和预测试验研究[J].工业建筑,1997,27(6):6-9.
- [4] 张维奇,桂国庆,徐远安.钢筋混凝土中盐化物对钢筋锈蚀危害分析及处理方法[J].南昌大学学报(工科版),2001,23(1):44-47.
- [5] 许清风,王孔藩,张晋.应关注混凝土结构中钢筋的腐蚀[J].四川建筑科学研究,2005,31(1):66-68.
- [6] SANCHUN YOON, KEJIN WANG, W JASON WEISS, et al. Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(6): 637 - 644.
- [7] 全明研.老化和损伤的钢筋混凝土构件的性能[J].工业建筑,1990,20(2):15-19.
- [8] 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.
- [9] CECS03:88,钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].
- [10] GB/T50081-2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [11] LIU JUNZHE, RATHISH P KUMAR. Study on diffusion of nitrite ions in concrete and on protective effect of nitrite [J]. Indian Concrete Institute, 2006, 7(4): 29 - 33.
- [12] 余璠璠,曹大富,李琼琦.钢筋混凝土锈蚀损伤研究综述[J].重庆建筑大学学报,2007,29(1):122-125.
- [13] GB50010-2002,混凝土结构设计规范[S].
- [14] 黄振国,李健美,郭乐工,等.受腐蚀钢筋混凝土材料基本性能与受弯构件的试验研究[J].建筑结构,1998(12):18-20.

(责任编辑 闫纯有)

作者: [安新正](#), [易成](#), [王晓虹](#), [张结太](#), [AN Xin-zheng](#), [YI Cheng](#), [WANG Xiao-hong](#),
[ZHANG Jie-tai](#)

作者单位: [安新正, AN Xin-zheng \(河北工程大学土木学院, 河北, 邯郸, 056038; 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京, 100083\)](#), [易成, YI Cheng \(中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京, 100083\)](#), [王晓虹, 张结太, WANG Xiao-hong, ZHANG Jie-tai \(河北工程大学土木学院, 河北, 邯郸, 056038\)](#)

刊名: [河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 

英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)

年, 卷(期): 2009, 26 (3)

被引用次数: 4次

参考文献(14条)

1. [MANGANT PRITPAL S; ELGANT MAHAMOUND S](#) [Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement](#) 1999(01)
2. [惠云玲; 李荣; 林志伸](#) [本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究](#) 1997(06)
3. [惠云玲](#) [混凝土结构中钢筋锈蚀程度评估和预测试验研究](#)[期刊论文]-[工业建筑](#) 1997(06)
4. [张维奇; 桂国庆; 徐远安](#) [钢筋混凝土中盐化物对钢筋锈蚀危害分析及处理方法](#)[期刊论文]-[南昌大学学报\(工科版\)](#) 2001(01)
5. [许清凤; 王孔藩; 张晋](#) [应关注混凝土结构中钢筋的腐蚀](#)[期刊论文]-[四川建筑科学研究](#) 2005(01)
6. [SANCHUN YOON; KEJIN WANG; W JASON WEISS](#) [Interaction between loading, corrosion, and serviceability of reinforced concrete](#)[外文期刊] 2000(06)
7. [全明研](#) [老化和损伤的钢筋混凝土构件的性能](#)[期刊论文]-[工业建筑](#) 1990(02)
8. [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](#)[期刊论文]-[土木工程学报](#) 2001(03)
9. CECS 03-1988. [钻芯法检测混凝土强度技术规程](#)
10. GB/T 50081-2002. [普通混凝土力学性能试验方法标准](#)
11. [LIE JUNZHE; RATHISH P KUMAR](#) [Study on diffusion of nitrite ions in concrete and on protective effect of nitrite](#) 2006(04)
12. [余瑶璟; 曹大富; 李琼琦](#) [钢筋混凝土锈蚀损伤研究综述](#)[期刊论文]-[重庆建筑大学学报](#) 2007(01)
13. GB 50010-2002. [混凝土结构设计规范](#)
14. [黄振国; 李健美; 郭乐工](#) [受腐蚀钢筋混凝土材料基本性能与受弯构件的试验研究](#) 1998(12)

引证文献(4条)

1. [安新正](#), [易成](#), [刘燕](#), [张结太](#) [硫酸盐侵蚀与冻融循环作用下混凝土损伤试验研究](#)[期刊论文]-[混凝土与水泥制品](#) 2010(2)
2. [李建军](#) [公路混凝土结构桥梁耐久性研究](#)[期刊论文]-[广东科技](#) 2010(14)
3. [安新正](#), [易成](#), [刘燕](#), [张结太](#) [再生混凝土与钢筋的粘结性能试验研究](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2010(3)
4. [安新正](#), [易成](#), [姜新佩](#), [刘超](#) [海水环境下再生混凝土的腐蚀研究](#)[期刊论文]-[河北工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2011(1)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200903005.aspx