

锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力评估

吴 瑾¹ 吴胜兴²

(1. 南京航空航天大学土木工程系 , 江苏 南京 210016 ; 2. 河海大学土木工程学院 , 江苏 南京 210098)

摘要 : 考虑锈胀力引起的钢筋周围混凝土双向应力状态 , 建立了锈蚀开裂前钢筋混凝土受弯构件承载力评估模型 ; 应用无粘结预应力钢筋应力计算方法 , 又建立了锈蚀开裂后钢筋混凝土受弯构件承载力评估模型 . 试验结果表明 : 建立的承载力评估模型与试验结果吻合较好 , 可用于锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力评估 .

关键词 : 锈蚀 ; 受弯承载力 ; 锈胀力 ; 无粘结钢筋

中图分类号 : TU375 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-198X(2004)03-0283-04

锈蚀钢筋混凝土构件承载力评估是依据现场检测的材料力学性能、几何尺寸、钢筋锈蚀量等参数 , 运用承载力评估模型 , 获得现存结构的承载力 . 国内外学者对锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力进行了一些研究 . 文献 [1-2] 通过对实际工程中拆换下来的锈蚀构件进行试验研究 , 考虑钢筋截面面积损失、钢筋强度降低、钢筋与混凝土协同工作系数 , 提出了按现行规范公式计算承载力的方法 . 文献 [3] 采用三维有限元程序近似分析了受损构件的承载力 . 文献 [4] 报道了在混凝土中掺氯化物养护 3 ~ 5 a , 能模拟构件在使用 20 a 后的锈蚀状态 , 考虑钢筋混凝土截面损失、钢筋屈服强度降低和粘结力损失 , 提出了按现行规范公式计算承载力的方法 . 文献 [5] 采用快速锈蚀试验 , 拟合出了钢筋锈蚀率对钢筋混凝土协同工作系数的影响公式 . 文献 [6] 通过对 111 根钢筋混凝土梁快速锈蚀试验 , 建立了钢筋不同锈蚀程度后构件的剩余弯曲强度计算模型 , 由于该模型需实测锈蚀电流 , 因此工程应用不便 . 文献 [1 ~ 6] 的研究没有考虑锈蚀开裂前在受压区由于钢筋锈蚀引起的混凝土拉压双向应力状态 , 当锈蚀裂缝开展较大时粘结力基本丧失 , 显然混凝土结构设计规范公式已不适用 . 本文考虑锈蚀开裂前后钢筋混凝土受弯构件受力特点 , 分别建立受弯承载力评估模型 .

1 锈蚀开裂前承载力评估模型

钢筋混凝土受弯构件锈蚀开裂前在受拉区 , 由于钢筋锈蚀面积通常减小不大 , 混凝土抗拉强度不考虑 , 因此钢筋锈蚀对受拉区影响不大 ; 在受压区 , 由于钢筋锈蚀膨胀使周围混凝土处于拉压双向应力状态 , 从而降低了混凝土抗压强度 . 本文考虑锈胀力影响范围为钢筋周围 a'_s 区域 [8] . 根据平截面假定、钢筋和混凝土应力应变关系假定 , 截面极限应力应变如图 1 .

图 1 中 : C_1 ——混凝土 $\sigma - \epsilon$ 曲线中二次抛物线部分合力 ; C_2 ——混凝土 $\sigma - \epsilon$ 曲线中直线部分合力 ; C_3 ——拉压应力状态下混凝土压应力的合力 ; σ_c —— $2a'_s$ 范围内拉压双向应力状态下抗压强度的平均值 . 当拉压双向应力状态时 , 混凝土抗压强度随另一向拉应力的增加而降低 (几乎成线性关系) [9] . 由 Nelisson 公式 , 拉压双向应力状态时 , 混凝土抗压强度

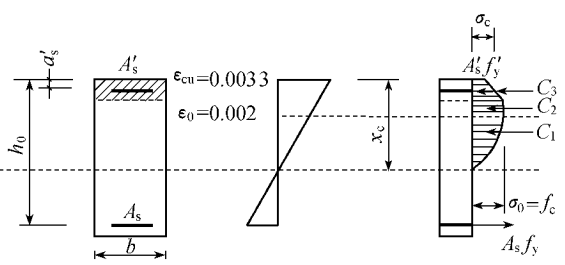


图 1 截面极限应力应变
Fig.1 Ultimate stress and strain in the section

$$\sigma_c = (- 1.6\sigma_1/f_c - 0.9) f_c \tag{1}$$

收稿日期 2003-11-15
基金项目 国家自然科学基金资助项目(50079002)
作者简介 吴瑾(1965—) 男 , 江苏灌云人 , 博士 , 主要从事混凝土结构耐久性研究 .

式中: σ_1 ——混凝土承受的最大拉应力 $\sigma_1 = f_t$. 混凝土抗拉强度 f_t 一般为抗压强度 f_c 的 8% ~ 12% ,为简化计算 取 $f_t = 0.1f_c$ 则 $\sigma_c = -0.74f_c$.

在图 1 混凝土应力部分 二次抛物线终点所对应的应变值 $\epsilon_0 = 0.002$ 所以二次抛物线高度 $y_0 = (\epsilon_0 / \epsilon_{cu}) x_c = (20/33) x_c$;直线应力段为两部分 ,一部分高度为 $2a'_s$,另一部分高度为 $x_c - y_0 - 2a'_s$,

$$x_c - y_0 - 2a'_s = (13/33) x_c - 2a'_s$$

由静力平衡条件代入 ,整理得

$$\left. \begin{aligned} (0.8x_c - 0.52 a'_s) f_c b + f'_y A'_s &= f_y A_s \\ \text{弯矩} \quad M &= 0.17 (x_c - 0.11 a'_s) f_c b x_c + 0.2 x_c f'_y A'_s + f_y A_s (h_0 - 0.2 x_c - a'_s) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

考虑钢筋锈蚀率对钢筋截面面积、钢筋屈服强度、钢筋混凝土粘结力下降的综合折减系数 $\eta^{[5]}$,

$$\eta = \begin{cases} 1 & \rho < 1.2 \\ 1.04514 - 0.03762\rho & \rho \geq 1.2 \end{cases}$$

式中: ρ ——钢筋锈蚀率 % ,对非均匀锈蚀 ,评估时按平均锈蚀率确定.

因此未开裂的锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力评估模型:

$$\left. \begin{aligned} (0.8x_c - 0.52 a'_s) f_c b + f'_y A'_s &= f_y A_s \\ M &= \eta [0.17 (x_c - 0.11 a'_s) f_c b x_c + 0.2 x_c f'_y A'_s + f_y A_s (h_0 - 0.2 x_c - a'_s)] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2 锈蚀开裂后承载力评估模型

锈蚀开裂后钢筋与混凝土之间的粘结有损失 ,这意味着再依据整个截面变形协调的极限弯矩公式计算已不适用.在保护层剥落的长度上钢筋与混凝土两者的剪应力传递丧失 ,此时钢筋拉应力沿无粘结长度均匀分布.由于材质的不均匀性和环境因素的影响 ,尤其是在氯离子侵蚀下 ,构件主要发生不均匀锈蚀(坑锈) ,常常是某一段严重锈蚀 ,而其它部分轻微锈蚀.为了简化分析 ,且从偏于安全角度出发 ,假定保护层锈蚀开裂后与钢筋的粘结应力完全损失 ,锈蚀开裂后受弯构件模型见图 2.

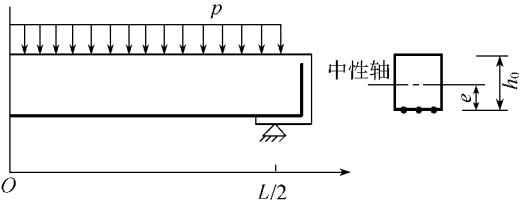


图 2 锈蚀开裂混凝土梁计算模型

Fig.2 Calculation model for cracked concrete beam subjected to corrosion

在荷载作用下 ,横向裂缝出现前 ,由变形协调条件知 :钢筋的总伸长与钢筋位置混凝土的总伸长相等 ,即:

$$\int_{-L/2}^{L/2} \epsilon_s dl = \int_{-L/2}^{L/2} \epsilon_c dl \quad (4)$$

设 M 为任一截面的弯矩 ,则该截面处钢筋位置混凝土的应变

$$\epsilon_c = \frac{Me}{E_c I} \quad (5)$$

式中: e ——截面形心至钢筋中心的距离 ; E_c ——混凝土弹性模量 ; I ——截面惯性矩.

钢筋位置混凝土的总伸长

$$\Delta = \frac{1}{E_c} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{Me}{I} dl \quad (6)$$

由式(4)得钢筋的应变

$$\epsilon_s = \frac{1}{E_s L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{Me}{I} dl \quad (7)$$

钢筋的应力

$$\sigma_s = \frac{\alpha_E}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{Me}{I} dl \quad (8)$$

式中 α_E 为钢筋与混凝土弹性模量比.

设梁跨中截面弯矩为 M_0 ,则离跨中截面 x 处的弯矩

$$M = M_0 [1 - (2x/L)^2] \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得钢筋的应力

$$\sigma_s = \frac{\alpha_E}{LI} \int_{-L/2}^{L/2} M_0 e[1 - (2x/L)^2] dx = \frac{2}{3} \left(\frac{\alpha_E M_0 e}{I} \right)$$

(10)

由式(10)可知:在横向裂缝出现前,无粘结混凝土梁中钢筋的应力为普通混凝土梁跨中截面钢筋应力的2/3。在横向裂缝出现后,总变形协调条件不再满足,即式(4)不再成立。文献[10]指出:无粘结混凝土梁的钢筋应力随荷载而增长的速度加快,但增长的量值仍比有粘结的混凝土梁最大弯矩截面的钢筋应力增长值小。《无粘结预应力混凝土结构技术规程》(JGJ/T92—93)中规定无粘结筋的极限应力

$$\sigma_s = \frac{1}{1.2} [\sigma_{pe} + (500 - 770\beta_0)]$$

(11)

$$\sigma_{pe} = 0 \qquad \beta_0 = \beta_p + \beta_s \leq 0.45 \qquad \beta_s = A_s f_y / b h_0 f_c \qquad \beta_p = 0$$

式中 β_s 为无粘结筋配筋指标。

由跨中截面平衡方程得锈蚀开裂后受弯构件承载力

$$M = A_s \sigma_s h_0 [1 - \beta_0 \sigma_s (2f_y)]$$

(12)

式中: A_s ——锈蚀后钢筋面积; σ_s ——锈蚀后无粘结钢筋极限应力,按式(11)计算; f_y ——钢筋锈蚀后钢筋屈服强度。

3 模型验证

河海大学^[11]、西安建筑科技大学^[12]及清华大学^[13]对锈蚀钢筋混凝土受弯构件进行试验,部分结果见表1。这些构件均为弯曲破坏。构件 S2A14U 和 S2A11U 中钢筋锈蚀,但混凝土保护层未开裂。其余构件混凝土保护层均开裂。本文模型计算结果亦列于表1。由表1可知,本文模型计算结果与试验结果较为一致。

表 1 锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力

Table 1 Flexural strength of reinforced concrete members subjected to corrosion												
构件编号	实测值						本文模型计算值				M_j/M_s	
	f_{cu}/MPa	b/mm	h_0/mm	$\rho/\%$	f_y/MPa	A_s/mm^2	$f_y A_s/\text{kN}$	$M_s/(\text{kN}\cdot\text{m})$	σ_s/MPa	$M_j/(\text{kN}\cdot\text{m})$		
文献 [11]	BAN-1	17.8	990	91	13.47	310	587	182.0	17.49	310	15.62	0.89
	BAN-2	18.1	983	83	6.03	348	637	221.7	18.08	320	15.75	0.87
	BAN-3	25.3	987	81	7.67	339	626	212.2	17.25	339	16.29	0.94
	BAN-4	21.6	982	79	12.08	317	596	188.9	16.77	317	14.08	0.84
	BAN-5	18.8	990	81	13.70	309	585	180.8	16.09	309	13.76	0.86
	BAN-6	9.9	986	92	14.08	307	583	179.0	17.24	289	14.05	0.81
	BAN-7	22.8	991	92	15.27	301	574	172.8	14.54	301	15.24	1.05
	BAN-8	16.8	993	78	9.11	332	616	204.5	17.06	316	14.04	0.82
	BAN-9	16.7	989	84	6.60	344	633	217.7	18.71	316	15.60	0.83
	BAN-10	21.0	985	89	7.06	342	630	215.5	20.04	341	18.00	0.90
文献 [12]	S2A14U	23.5	62	147	2.2			27.5	4.74		4.85	1.02
	S2A11U	23.5	62	163	2.4			30.2	5.92		5.53	0.93
	S2A10U	23.5	62	155	3.2			29.5	5.00	271	4.17	0.83
	S2A10D	23.5	62	158	3.6			28.0	4.78	257	4.06	0.85
	S2A09D	23.5	62	153	3.8			29.9	4.68	274	4.16	0.88
	S2A06D	23.5	62	155	4.6			30.5	5.06	282	4.29	0.85
文献 [13]	A21	39.6	154	218	7.11	383	286	109.5	21.84	345	20.40	0.94
	A22	39.6	158	224	10.17	387	277	107.2	22.19	352	20.81	0.94
	A31	38.1	176	221	4.60	381	294	112.0	22.40	351	21.73	0.97
	A32	38.1	176	220	8.49	382	282	107.7	24.21	353	20.90	0.86

4 结 论

在锈蚀开裂前,依据平截面假定,考虑锈胀力引起钢筋周围混凝土双向应力状态,建立了锈蚀开裂前受弯构件承载力评估模型。在锈蚀开裂后,由于钢筋与混凝土粘结损失较大,各截面钢筋与其位置处的混凝土应变不再相等,因此现行规范的受弯构件承载力计算公式不再适用。采用无粘结预应力混凝土设计方法,建

立了锈蚀开裂后受弯构件承载力评估模型. 试验结果表明: 本文建立的锈蚀开裂前后受弯构件承载力评估模型与试验结果吻合较好, 可用于锈蚀钢筋混凝土受弯构件承载力评估.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陶峰, 王林科. 服役钢筋混凝土构件承载力的试验研究[J]. 工业建筑, 1996, 26(4): 17—20.
- [3] 惠卓, 王庆霖. 受损构件承载力的计算机模拟[J]. 西安建筑科技大学学报, 1997, 29(4): 430—434.
- [4] 惠云玲, 李荣. 混凝土基本构件钢筋锈蚀前后性能试验研究[J]. 工业建筑, 1997, 27(6): 14—18.
- [5] 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—11.
- [6] PRITPAL S M, MAHMOUD S E. Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 1999, 96(1): 149—158.
- [7] ROBERTO C, NILDE C. Identification of damage in reinforced concrete beams subjected to corrosion[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(6): 902—909.
- [8] 周氏, 康清梁, 童保全. 现代钢筋混凝土基本理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989. 83—89.
- [9] 王庆霖, 池永亮. 锈后无粘结钢筋混凝土梁的模拟与分析[J]. 建筑结构, 2001, 31(4): 51—53.
- [10] 杜拱辰. 现代预应力混凝土结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988. 193—195.
- [11] 卞汉兵. 海洋环境锈蚀钢筋混凝土板的试验研究及理论分析[D]. 南京: 河海大学, 2003.
- [12] 牛荻涛, 翟彬, 王林科. 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力分析[J]. 建筑结构, 1999(8): 23—25.
- [13] 宋晓冰. 钢筋混凝土结构中的钢筋腐蚀[D]. 北京: 清华大学, 1999.

Evaluation of flexural strength of reinforced concrete members subjected to corrosion

WU Jin¹, WU Sheng-xing²

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: In consideration of the bi-directional stress state of concrete around the reinforcement caused by the corrosion-induced expansion force, a flexural strength evaluation method is developed for reinforced concrete members before the occurrence of corrosion-induced cracks. By use of the stress calculation method for unbonded prestressed reinforcement, another evaluation model is developed for reinforced concrete flexure members after cracking. Experiments show that the models developed are in good agreement with experimental results. So the models can be used for evaluation of flexural strength of corroded reinforced concrete members.

Key words: corrosion; flexural strength; corrosion-induced expansion force; unbonded reinforcement