

文章编号 1000-5013(2005)01-0054-04

砼保护层胀裂时钢筋锈蚀量的计算模型

施养杭 罗 刚 华建兵

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021; 中国核工业部上海建筑设计院, 上海 200000)

摘要 根据钢筋锈蚀后砼的开裂状态,以及现有胀裂锈蚀量的计算模型特点,考虑砼相对保护层厚度的影响,提出一种更符合工程实际情况的砼胀裂时钢筋锈蚀量的计算模型.经实例验证,该计算模型可行、有效,计算结果与实际情况相符合.

关键词 相对保护层厚度, 砼胀裂, 钢筋锈蚀量, 计算模型

中图分类号 TU 511.3⁺20.3

文献标识码 A

砼的碳化、碱集料反应、氯离子的侵蚀和冻融环境的影响,会导致潜在的钢筋发生锈蚀和锈胀.从而引起砼保护层的胀裂和脱落,严重地危机砼结构的使用寿命.由此而造成巨大损失往往超出人们的预料,所以砼中钢筋锈蚀问题已成为一个世界性共同关注的课题.为此,本文研究分析并提供钢筋锈蚀量的计算方法,以供应用参考.

1 钢筋锈蚀对砼的影响

砼中钢筋一旦锈蚀,将在其表面生成一层疏松状的锈蚀产物.锈蚀物的体积比被锈蚀钢筋的体积大 2~4 倍(即体积膨胀).从而对砼产生一系列的不良影响,引起砼的损伤.随着砼中钢筋锈蚀的发生和发展,因钢筋锈蚀而对砼的影响过程可分为 6 个阶段.(1) 钢筋脱钝阶段.(2) 锈蚀发生和自由膨胀阶段.(3) 钢筋周围砼应力产生阶段.(4) 砼保护层开裂和裂缝发展阶段.(5) 钢筋与砼粘结力丧失阶段.(6) 砼沿纵筋方向开裂和砼保护层脱落.砼保护层开裂、开裂的部位、钢筋锈蚀程度均与钢筋直径、保护层厚度、钢筋间距和位置有关,如图 1 表示^[1].

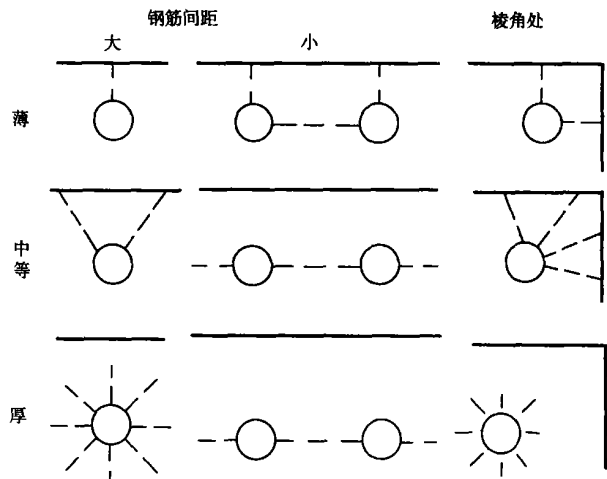


图 1 钢筋锈胀引起的砼开裂形态

2 砼保护层胀裂时钢筋的锈蚀量

2.1 现有的胀裂锈蚀量计算模型

现有的胀裂锈蚀量的计算模型按建立途径,分为理论模型和经验模型两类.理论模型

是建立在力学分析基础之上,以 Bazant 模型^[2,3]为代表,以弹性力学为基础.假设锈蚀产物在钢筋表面均匀分布,因此锈蚀产物体积膨胀在钢筋与砼界面产生均匀压力 P_r .根据钢筋在砼中的位置,假设因钢筋锈蚀导致砼保护层胀裂有 3 种破坏形态.即角区胀裂、一般边胀裂和整体剥落.其模型如图 2 所示,相应的锈胀压力 P_r ^[3]分别为

收稿日期 2004-05-18

作者简介 施养杭(1961-),男,副教授,在职博士,主要从事结构寿命的研究. E-mail: d. s666 @163. com

基金项目 国家自然科学基金资助项目(59979018)

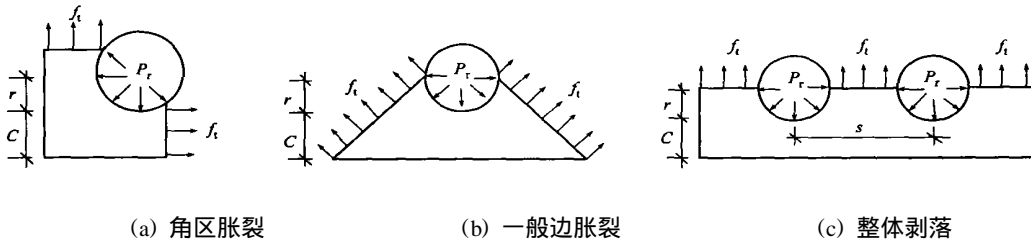


图 2 保护层基本破坏的力学模型

$$P_r = \frac{\sqrt{2} f_{tk} [C + (1 - \sqrt{2}/2) r]}{2r}, \quad (1)$$

$$P_r = \frac{f_{tk} (C + r)}{r}, \quad (2)$$

$$P_r = \frac{f_{tk} (s - 2r)}{2r}. \quad (3)$$

在上面 3 个式子中, C 为砼保护层厚度, f_{tk} 为砼轴心抗拉强度标准值, s 为相邻两根钢筋的间距, r 为钢筋半径. 所以, 由锈胀力 P_r 可求得钢筋因锈蚀而引起的半径损失量 r , 即

$$r = p \cdot P_r. \quad (4)$$

在式(4)中, p 为钢筋所处孔洞的径向柔度系数. 因此, 根据胀裂形态确定 P_r , 继而求得钢筋半径的损失量 r , 最后计算钢筋截面或重量的损失值, 即钢筋的锈蚀量. 由此可见, Bazant 模型是基于破坏形态的模型, 它考虑了钢筋位置、相对保护层厚 C/d , 以及钢筋间距等因素对锈胀力的影响. 但是, Bazant 模型假设破坏面形态与 C/d 无关. 根据有限元分析而知, C/d 对破坏面位置有明显的影响. 经验模型^[4,5]则侧重于试验研究或调查分析, 根据试验或调查数据, 经归纳统计得出相应的计算公式. 因钢筋锈蚀受环境等因素的影响十分显著, 且试验或调查的数据不论在数量上或在准确度上都存在不足, 故经验模型难以推广. 显然, 现有模型均有局限性.

2.2 面向实际情形的胀裂锈蚀量计算模型

在 Bazant 模型的基础上, 考虑相对保护层厚度 C/d 、钢筋位置及相邻钢筋锈蚀量的相互影响, 建立体现实际情况的保护层胀裂钢筋锈蚀量计算模型. 当钢筋位于一般边胀裂时, 考虑到 C/d 、破坏面与底边夹角及相邻钢筋锈蚀对孔边最大主拉应力的影响后, 得出锈胀力的计算公式为

$$P_r^N = \frac{k_1 \cdot f_{tk} \cdot (C + r)}{k_2 \cdot k_3 \cdot r}, \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= 2.46 (C/d)^{0.594}, & k_2 &= 1 + 2.70e^{-2.62(C/d)}, & k_3 &= 1 + 4.46e^{-1.81(s/d)} \end{aligned} \right\}$$

在式(5)中, P_r^N 为对应于一般边钢筋胀裂时的锈胀力, k_1 为考虑破坏面角影响的系数, k_2 为考虑相对保护层厚度 C/d 影响的系数, k_3 为考虑相邻钢筋间距影响的系数, f_{tk} 为砼抗拉强度标准值, C 为保护层厚度, r 为钢筋半径, d 为钢筋直径, s 为相邻钢筋的间距. 当钢筋位于角部胀裂时, 当保护层厚度较大, 在钢筋锈胀后, 砼开裂出现在主拉应力峰值的位置, 则钢筋的锈胀模式如图 3 所示. 胀裂部分被分成和 两个部分. 据有限元分析, C/d 的变化对主拉应力和 x 轴的夹角影响不大, 胀裂裂缝与保护层边界的夹角约为 45° , 计算模型如图 4 所示. 利用静力平衡条件, 可得角部钢筋的锈胀力计算公式为

$$P_r^C = \frac{\sqrt{2} [C + (1 - \sqrt{2}/2) r]}{r} \cdot f_{tk}. \quad (6)$$

考虑到 C/d 对钢筋周围砼的最大主拉应力的影响, 引入修正系数 k_4 , 则

$$P_r^C = \frac{\sqrt{2} [C + (1 - \sqrt{2}/2) r]}{r \cdot k_4} \cdot f_{tk}, \quad k_4 = 1 + 3.94e^{-2.822(C/d)}. \quad (7)$$

在上式中, P_r^N 为钢筋胀裂时的锈胀力, k_4 为 C/d 影响的系数, 其余符号如前所述. 当因钢筋锈胀引起整体脱落, 且在保护层较厚且同排钢筋间距 s 较小时, 砼保护层胀裂的破坏形态为整体剥落. 考虑到 C/d 和钢筋间距 s 对孔边最大主拉应力和破坏面位置的影响, 得出对应的锈胀力为

$$P_r^v = \frac{s - 2r}{k_5 \cdot r} \cdot f_{tk}, \quad k_5 = 1 + 4.68e^{-1.2(C/d + s/d)}. \quad (8)$$

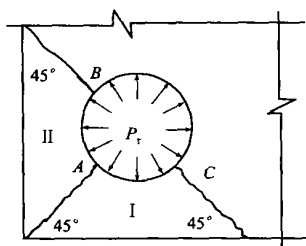


图 3 角部钢筋锈蚀导致的保护层胀裂模型

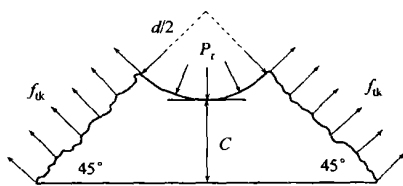


图 4 角部钢筋胀胀力 P_r 计算模型

在上式中 P_r^v 为整体剥落时的锈胀力, k_5 为 C/d 及钢筋间距对最大主拉应力的影响系数, 其余符号如前所述. 对钢筋的胀锈量计算通过钢筋半径的损失, 以及锈蚀物的体积膨胀率计算. 所以, 由式(5)~(8)可求得 k_1, k_2, k_3, k_4 和 k_5 . 代入相应的锈胀力计算公式, 再代入式(4), 可求得在锈胀力作用下, 对应于一般边、角部和整体剥落时钢筋孔洞的径向变形 r^N, r^C 和 r^W . 即

$$r^N = \frac{k_1 \cdot f_{tk} \cdot (C + r)}{k_2 \cdot k_3 \cdot r} \cdot p,$$

9

$$P_r^C = \frac{\sqrt{2} [C + (1 - \sqrt{2}/2) r]}{r \cdot k_4} \cdot f_{tk} \cdot p,$$

10

$$r^W = \frac{s - 2r}{k_5 \cdot r} f_{tk} \cdot p,$$

11

$$p = [1 + \mu + \frac{r^2}{C(C + 2r)}] \cdot \frac{2r}{E_{ef}}.$$

12

在式(9)~(12)中, μ 为砼得泊松比, E_{ef} 为考虑了砼长期使用过程中徐变的等效弹性模量, 即 $E_{ef} = E_C / (1 +) E_C$ 为砼的弹性模量, 为砼徐变系数, 其余符号的意义如前所述.

根据钢筋锈蚀前后的特点, 钢筋砼和锈蚀产物间的变形关系(图 5), 锈蚀前钢筋和砼交界面有空隙 r_0 存在. 当锈蚀导致保护层胀裂时, 钢筋半径损失为 r_s , 在锈胀力作用下, 钢筋周围砼发生径向位移为 r_c . 设锈蚀产生的体积膨胀率为 E , 则

$$r_s = \frac{r_0 + r_c}{E - 1}.$$

13

因为 r_s 远小于钢筋半径 r , 所以钢筋的截面锈蚀率为

$$= \frac{2 r_s}{(E - 1) \cdot r}.$$

14

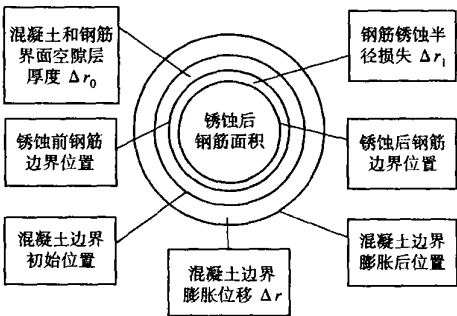


图 5 钢筋与砼和锈蚀产物变形关系示意图

3 计算模型验算实例

按本文所建模型, 对多个实例进行验算, 结果表明, 计算模型有效、可行, 具有较高的实用性. 根据快速锈蚀试验结果. 取砼徐变系数 = 1.0, 锈蚀产物体积膨胀率 $E = 3$, 砼弹性模量及抗拉强度标准值按《GB 50010-2002 砼结构设计规范》中规定取用. 经本文模型计算, 结果如表 1 所示. 由此可见, 计算的钢筋截面锈蚀率为 1.14~0.93 倍的实测值, 结果理想.

表 1 实例数据与模型计算结果对比^[7]

序号	C/mm	d/mm	位置	砼等级	E/MPa	f_{tk} /MPa	r_s	1/(%)	2/(%)	1/2
1	25	16	一般	C20	25 500	1.54	0.020 9	0.523 1	0.46	1.140
2	25	20	一般	C20	25 500	1.54	0.025 1	0.502 9	0.45	1.110
3	25	25	一般	C20	25 500	1.54	0.023 5	0.376 5	0.37	1.010
4	30	16	一般	C20	25 500	1.54	0.031 6	0.790 6	0.85	0.930
5	35	16	一般	C20	25 500	1.54	0.036 8	0.919 2	0.93	0.988

续表

序号	C/mm	d/mm	位置	砼等级	E/MPa	f_{tk} /MPa	r_s	1/(%)	2/(%)	1/2
6	25	16	一般	C30	300 00	2. 01	0. 031 8	0. 794 3	0. 81	0. 981
7	25	16	一般	C40	325 00	2. 39	0. 045 8	1. 146 6	1. 17	0. 980
8	25	16	角区	C20	25 500	1. 54	0. 018 3	0. 456 7	0. 43	1. 062
9	25	20	角区	C20	25 500	1. 54	0. 018 6	0. 372 4	0. 39	0. 954
10	25	25	角区	C20	25 500	1. 54	0. 018 8	0. 301 0	0. 3	1. 003
11	30	16	角区	C20	25 500	1. 54	0. 022 8	0. 569 8	0. 58	0. 982
12	35	16	角区	C20	25 500	1. 54	0. 024 1	0. 601 4	0. 62	0. 970
13	25	16	角区	C30	300 00	2. 01	0. 026 2	0. 653 5	0. 67	0. 975
14	25	16	角区	C40	325 00	2. 39	0. 034 0	0. 849 7	0. 67	0. 977

4 结束语

随着建筑高峰期后结构耐久性问题的日益凸现, 砼保护层因钢筋锈胀而开裂已是耐久性研究的关键内容. 因此, 科学地预测砼结构及其构件中钢筋的锈胀量尤为重要. 本文根据钢筋锈蚀机理及其对砼的影响, 针对现有计算模型的不足, 在综合分析研究钢筋的位置、相邻钢筋锈胀影响和砼保护层相对厚度等因素, 提出一种切合实际胀裂时钢筋锈蚀量计算模型. 经实测数据验证, 该模型有效、实用. 这对于合理地分析砼地开裂、结构的耐久性, 乃至科学地预测结构寿命均有重要意义.

参 考 文 献

1 洪定海. 砼中钢筋地锈蚀与保护[M]. 北京:中国铁道出版社, 1998. 16 ~ 67

2 Bazant Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structure: Theory[J]. Journal of Structural Divion ,ASCE,1979 ,105 (6) :1 137 ~ 1 153

3 Bazant Z P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structure: Application[J]. Journal of Structural Divion ,ASCE,1979 , 105 (6) :1 155 ~ 1 166

4 牛荻涛,王庆霖,王林科. 锈蚀开裂前砼中钢筋锈蚀量地预测模型[J]. 工业建筑,1996 ,(4) :8 ~ 10

5 牛荻涛,王庆霖,王林科. 锈蚀开裂后砼中钢筋锈蚀量地预测模型[J]. 工业建筑,1996 ,(4) :11 ~ 13

6 张伟平. 砼结构钢筋锈蚀损伤识别及其耐久性[D]:[学位论文]. 上海:同济大学土木工程系,1999. 59 ~ 65

7 李海波,鄢 飞. 钢筋砼结构开裂时刻的钢筋锈胀力模型[J]. 浙江大学学报(工学版),2000,34(7) :415 ~ 422

A Model of Computing Corrosion Rate of Reinforcing Bar
Following Spalling of Concrete Cover

Shi Yanghang Luo Gang Hua Jianbing

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China;
Shanghai Institute of Achitectural Design, Ministry of Nuclear Industry, 200000, Shanghai, China)

Abstract For computing corrosion rate of reinforcing bar following spalling of concrete cover, the authors present a model even more satisfying actual situation of engineering. The computation model is based on cracking state of concrete after corrosion of reinforcing bar; it directs against the characteristics of existing model for computing corrosion rate after spalling of concrete cover; and it takes the influence of relative thickness of concrete cover into consideration. The computation model is confirmed by living examples to be feasible and effective; its reckoning tallies with actual situation.

Keywords relative thickness of concrete cover, spalling of concrete, coorosion rate of reinforcing bar, computation model