

文章编号: 1005—0523(2006)01—0029—04

损伤混凝土构件中钢筋界限锈蚀量的研究

吕 广, 谢 楠

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:研究了混凝土的徐变和混凝土的非线性性质, 研究损伤混凝土构件中钢筋界限锈蚀量, 用有限元软件 ANSYS 对钢筋锈蚀效应进行了非线性有限元分析. 计算表明: 保护层厚度与钢筋直径的比、混凝土的强度是影响混凝土保护层开裂时钢筋锈蚀深度(界限锈蚀深度)的重要因素. 比值越大, 界限锈蚀深度越大; 混凝土的强度越大, 界限锈蚀深度越大.

关 键 词: 钢筋锈蚀; ANSYS; 混凝土徐变; 混凝土非线性

中图分类号: TU37

文献标识码: A

1 绪言

钢筋混凝土结构在使用过程中, 受到碳化、氯离子侵蚀等导致钢筋锈蚀, 钢筋锈蚀产物的体积是原来体积的 3~4 倍^[1], 使钢筋周围混凝土保护层开裂. 混凝土开裂后, 钢筋锈蚀速度加快, 从而对结构的使用功能产生较大的影响, 甚至危及结构的安全. 目前在钢筋混凝土寿命评估时, 常以钢筋锈蚀混凝土开裂作为寿命终结的标志. 因此, 混凝土胀裂时钢筋锈蚀量是实现耐久性等级评估及剩余使用寿命预测的关键因素.

国内外学者就此进行了大量的试验研究和理论分析. 牛荪涛^[1]采用电化学快速锈蚀试验对钢筋锈蚀开裂的条件进行了研究; 日本的堤知明^[2]应用弹性力学方法, 就混凝土中钢筋锈胀开裂的形态进行了研究; 桔高义典^[3]基于断裂力学理论确立了钢筋锈胀引起保护层开裂的计算方法; 龟谷英树^[4]直接向混凝土单元施加膨胀位移荷载来模拟钢筋锈胀, 进行有限元分析, 对锈胀裂缝的开展方向和界限锈蚀率进行了研究; 张伟平^[5]采用温度膨胀环模拟钢筋锈损部分, 施加单位温度荷载,

温度膨胀环的热膨胀系数为锈蚀产物膨胀率, 通过改变温度膨胀环的厚度来模拟钢筋锈胀发展过程, 进行了有限元分析.

研究表明, 影响钢筋锈胀开裂的因素有混凝土保护层厚度、钢筋直径和混凝土强度, 此外钢筋种类(光圆钢筋、变形钢筋)、实际钢筋位置(角区、非角区)、钢筋间距等对锈胀开裂也有较大影响. 以上研究分析中没有考虑混凝土的非线性性质, 这与实际情况有一定的差别. 本文在此基础上, 考虑混凝土材料的非线性和混凝土徐变的影响对钢筋锈胀进行了非线性有限元分析, 重点研究混凝土保护层厚度和钢筋直径的比以及混凝土强度对界限锈蚀深度的影响, 为损伤混凝土构件的安全性评定打下基础.

2 分析要点

2.1 计算模型

因钢筋锈蚀而引起的混凝土受力分析假定为平面应变问题, 选取单位厚度进行有限元建模. 在钢筋表面设置温度膨胀筒, 施加温度力来模拟钢筋锈胀. 假定顺筋方向不膨胀, 平面内均匀膨胀. 其中

收稿日期: 2005—07—20

基金项目: 北京交通大学校自然科学基金资助项目(2003SM024)和北京市自然科学基金项目资助(编号: 8032011)

作者简介: 吕广(1980—), 男, 辽宁人, 研究生, 主要从事结构耐久性研究.

混凝土部分采用 solid65 单元, solid65 单元是 ANSYS 软件中专门用于模拟混凝土的单元, 可以模拟混凝土的拉裂和压碎, 与该单元相应的材料需要定义两项内容才能真实地模拟混凝土的材料特征, 即混凝土的本构关系和破坏准则, 关于混凝土的本构关系和破坏准则的选取在 2.4 中详述; 混凝土初始刚度矩阵见式(1)^[6], 混凝土出现第一条裂缝的刚度矩阵见式(2). 温度膨胀筒采用三维实体弹性 solid45 单元, 由于钢筋的弹性模量比混凝土大很多, 所以钢筋部分不建模, 直接在温度膨胀筒内表面施加径向位移约束. 计算有限元模型如图 1. 图中深色部分为温度膨胀筒, 采用 Newton-Raphson 方法求解非线性有限元方程.

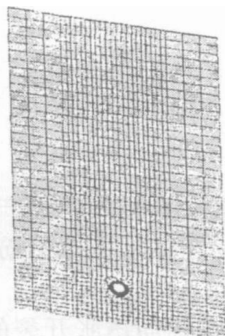


图 1

2.2 考虑混凝土徐变的影响

混凝土的徐变系数随着时间变化, 时间越长, 徐变系数越大^[10]. 本文采用折减混凝土弹性模量的方法来考虑徐变的影响. 折减后弹性模量 E_{CE} 的计算如下^[4]:

$$E_{CE} = \frac{E_C}{1 + \phi_C} \quad (1)$$

式中 E_C —— 混凝土弹性模量;

ϕ_C —— 混凝土徐变系数.

2.3 界限锈蚀深度 Δ 的计算

本文采用文献[6]中给出的界限锈蚀深度 Δ 的计算公式, 见式(2).

$$\Delta = \frac{-\Delta h E'_Y - \Delta p E'_Y}{n q_0 - (n-1) E_Y} \quad (2)$$

式中 Δh —— 钢筋孔边混凝土的位移

E'_Y —— 考虑徐变折减后的混凝土弹性模量

q_0 —— 钢筋孔边混凝土的应力

n —— 钢筋锈蚀产物膨胀率, n 取 2.5

Δp —— 钢筋和混凝土之间的空隙, Δp 取 0.0135 mm

此公式的具体含义如图 2 所示, 考虑实际的钢

筋和混凝土之间存在空隙, 钢筋锈蚀膨胀首先填充空隙, 空隙 Δp 取 0.00135 mm, 钢筋锈蚀产物膨胀率 n 参考文献^[6]取 2.5.

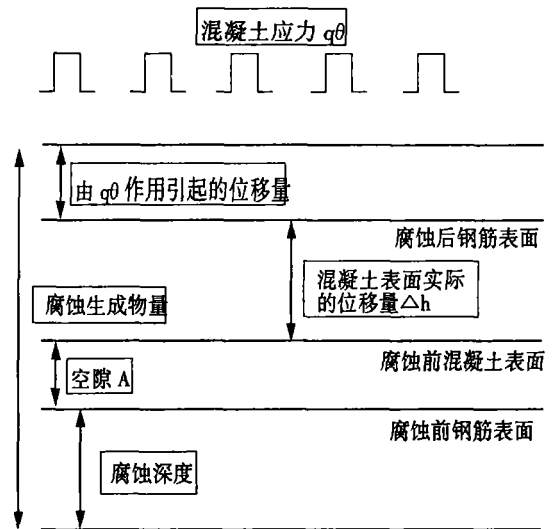


图 2 钢筋锈蚀深度模型

2.4 混凝土非线性

混凝土在应力比较低时, 就会产生裂缝、非线性变形. 因此在钢筋锈胀计算中必须考虑混凝土的非线性行为. 进行混凝土有限元计算, 混凝土材料的定义尤为重要, 本文通过定义混凝土的本构曲线和破坏准则来反映混凝土的材料性质.

2.4.1 混凝土应力应变曲线

混凝土的轴向受压应力应变曲线如图 3 所示, 上升段采用 saenz 公式^[7](5)

$$\sigma = \frac{E_0 \epsilon}{1 + \left[\frac{E_0}{E_s} - 2 \right] \frac{\epsilon}{\epsilon_0} + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2} \quad (3)$$

式中 E_0 为初始弹性模量;

ϵ_0 为极限压应变.

经过多次试算和比较, 下降段简化为平滑段, 这种简化有助于计算收敛, 并且同规范的混凝土应力应变关系较为接近, 便于理论计算和有限元计算的对比.

对于混凝土轴向受拉, 在计算中假定混凝土受拉时的应力-应变关系均为直线直到开裂.

2.4.2 混凝土的破坏准则

通过定义混凝土的极限受拉强度和受压强度, 就可以确定混凝土在多向应力状态下的破坏准则, 计算采用 William Warnke 准则^[8]. 混凝土的三向破坏面如图 4 所示. 其中 σ_{xp} 和 σ_{yp} 分别代表 x 和 y 方向的非零主应力, 三向破坏面投影在 $\sigma_{xp} - \sigma_{yp}$ 一平面

上,破坏模式就成了关于 σ_p 的函数(z 方向的主应力).如果 σ_{xp} 和 σ_{yp} 均为负(受压),并且 σ_{zp} 为正(受拉),开裂裂缝将由 σ_{zp} 来控制.如果 σ_{zp} 为零或是负值,材料将被压碎.

在混凝土单元中,当主拉应力在某个方向超出荷载破坏面时,就会出现开裂,开裂后,平行于主拉应力方向的弹性模量就变为零.当主应力均为压应力且超出荷载破坏面时,就会出现压碎,因而所有方向的弹性模量都变为零,单元失效.

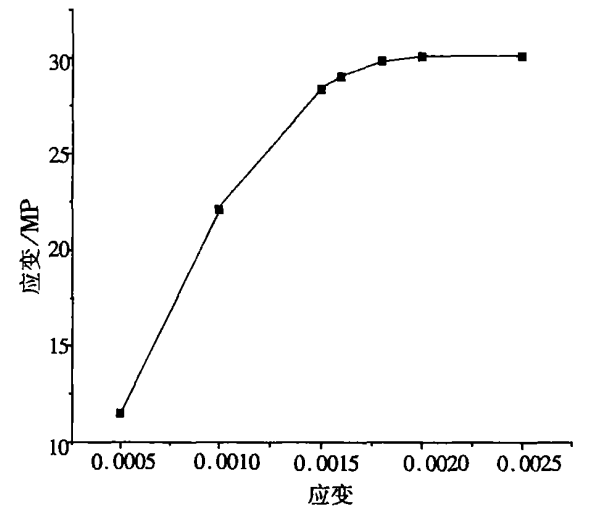


图 3 混凝土单轴应力应变曲线

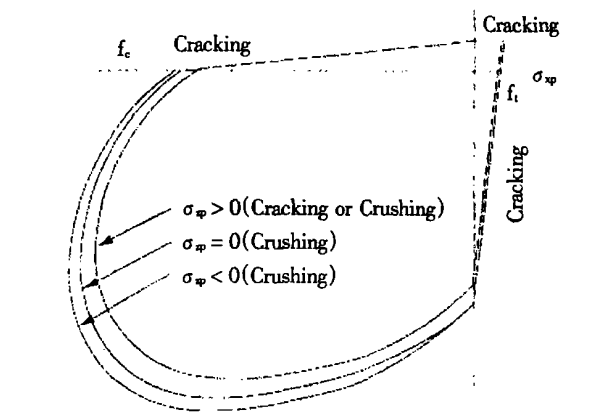


图 4 混凝土三向破坏面

3 计算结果

本文考虑混凝土徐变影响,同文献[6]一样,混凝土徐变系数 ϕ_c 取 2.5,混凝土强度等级为 C30.研究了 D/ϕ ($D=2C+\phi$, C —混凝土保护层厚度; ϕ —钢筋直径)对界限锈蚀深度的影响,不同的 D/ϕ

值及其相应的界限锈蚀深度见表 1.取 $D/\phi=4.13$,研究混凝土强度对界限锈蚀深度的影响,混凝土强度及其对应的界限锈蚀深度见表 2. D/ϕ 和界限锈蚀深度的相关曲线如图 4,混凝土抗压强度与界限锈蚀深度曲线如图 5 所示.

表 1 及其对应的界限锈蚀深度表			
D/ϕ	q^0 (N/mm^2)	Δh (mm)	界限锈蚀深度 Δ (μm)
1.8	1.51	0.0121	17.1
2.5	2.13	0.0164	20.1
3.3	2.56	0.0208	23.1
4.1	3.12	0.024	25.2
4.9	3.35	0.031	30
5.7	3.5	0.033	31.3
7.2	3.7	0.045	39.4

表 2 混凝土强度及其界限锈蚀深度表			
混凝土抗压强度	q^0 (N/mm^2)	Δh (mm)	界限锈蚀深度 Δ (μm)
10	0.56	0.0082	14.4
15	0.862	0.012	17.1
20	1.356	0.0159	19.7
25	2.234	0.0175	20.8
30	3.05	0.023	24.5

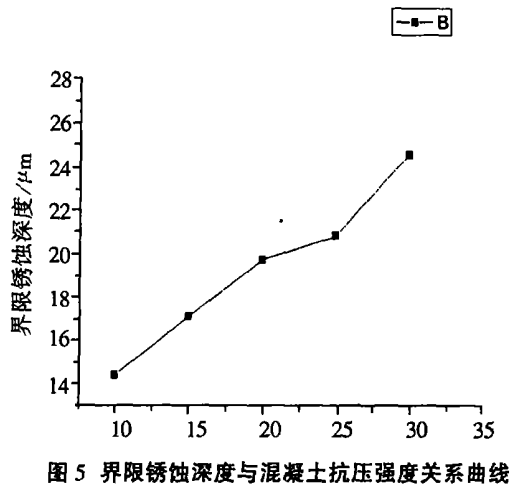
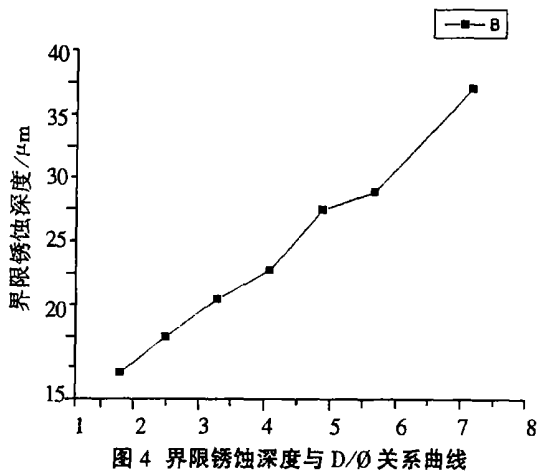
通过以上分析可以看出:

- 1) 界限锈蚀深度与 D/ϕ 的关系近似于直线,随着 D/ϕ 值的增大,界限锈蚀深度增大;
- 2) 界限锈蚀深度和混凝土抗压强度的关系也近似于直线,随着混凝土抗压强度的增大,界限锈蚀深度增大.

4 总结与讨论

本文考虑了混凝土徐变和混凝土的非线性性质,对钢筋锈蚀膨胀进行了非线性有限元分析,探讨了影响混凝土保护层胀裂时钢筋锈蚀量的影响因素,并由计算得出混凝土保护层胀裂时钢筋锈蚀量与其影响因素的关系,发现界限锈蚀深度和混凝土抗压强度都近似成直线关系.

本研究所计算的界限锈蚀深度较文献[1]试验所得结果偏小.分析原因如下:实际锈蚀过程锈蚀产物会渗进混凝土孔隙中,另外工程上常用的锈裂极限指混凝土裂缝宽度达到 0.1 mm 时的状态.而本文采用有限元仿真计算时这两项内容无法考虑,故而计算值偏小,在今后的计算中应考虑这一影响因素.



另外徐变系数的取值要考虑混凝土构件工作时间的长短,在今后的计算中应给予考虑。

本文研究可为损伤混凝土构件的安全性评定打下基础。

参考文献:

- [1] 牛荻涛,潘振华. 钢筋锈蚀开裂条件的试验研究[J]. 工业建筑, 1999, 5(29): 46~49.
- [2] 堤知明,松岛学. 腐食ひび割れの生机构に関する研究[J]. 日本:土木学会文集, 1996, 30(532): 159~166.
- [3] 橘高义典. 鉄筋の腐食に伴うコンクリート表面のひび割れ開口の破壊力学的解析[J]. 日本:コンクリート工学次論文報告集, 1996, 2(18): 449~454.
- [4] 龟谷英树,佐藤靖彦,上田多门. 鉄筋の腐食膨張によるかぶりひび割れ性状の解析的検討[J]. 日本:コンクリート工学会論文集, 1996, 1(18): 783~788.
- [5] 张伟平,张誉. 混凝土中钢筋锈胀过程的计算机仿真分析[J]. 同济大学学报, 2001, 11(29): 1374~1377.
- [6] 田中 大博,伊泽纯平. 害劣化を受けるコンクリート构造物の腐食ひび割れが生ずる 限界腐食減量にする研究[R]. 日本, 2005.
- [7] 吕西林,金国芳. 钢筋混凝土结构非线性有限元理论与应用[M]. 上海:同济大学出版社, 1996.
- [8] Willam, K. J. and Warnke, E. D. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete [C]. Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 19, ISMES, Bergamo, Italy, 1975.
- [9] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.

The Limit Corrosion Penetration of Degraded Concrete Members

LV Guang, XIE Nan

(School of Civil Engineering & Architecture, Beijing Jiaotong Univ., Beijing 100044, China)

Abstract: In this paper, a new improved method, which considers concrete creep and nonlinear behavior of concrete, is proposed to study the limit corrosion penetration of degraded concrete members. Finite element numerical analyses in means of ANSYS are carried out. The study shows that there are two main factors affecting the limit corrosion penetration, the ratio of the thickness of concrete cover to the diameter of rebar and the concrete strength, and the limit corrosion penetration will increase as the ratio and concrete strength increase.

Key words: rebar corrosion, ANSYS, concrete creep, nonlinear behavior of concrete