

钢筋混凝土结构腐蚀损伤裂纹 扩展轨迹模拟与数值分析

李永和 葛修润

(上海大学) (中科院武汉岩土力学所)

摘要 通过取样检测,系统分析了钢筋锈蚀形状变化特征、混凝土表面裂纹宽度变化特征;在取样检测分析的基础上,给出了钢筋锈蚀层椭圆外轮廓线数学模型和相应的任一点锈蚀层厚度的计算公式;然后依据三个基本假定,给出锈蚀层虚拟边界位移离散化力学模型和相应的虚拟边界位移解和虚拟边界应力解;最后在虚拟边界位移条件下,用数值流形元法模拟了二类锈胀随服役时间变化引起裂纹扩展轨迹的问题,其模拟结果与实验结果相吻合。

关键词 锈蚀层 模型 虚拟边界 位移条件 数值流形元法 裂纹扩展

中图分类号: TU375.01 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X(2003)02-0001-05

NUMERICAL ANALYSIS FOR CORROSION INDUCED CRACK PROPAGATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Li Yonghe

Ge Xiurun

(Shanghai University) (Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Both a model for the contour of corrosion layer and a formula for the rust thickness are proposed in the paper. It is found that the contour is varied in an ellipse shape based on the in-site measured data. Three assumptions are made to get the solution of displacements and stresses varied with different boundary. At last, two kinds of the corrosion induced crack propagation are solved by the numerical manifold method. It is in the state of fictitious displacement boundary varied with time. It is found that the result is agreed with the test one.

Keywords: corrosion layer, model, fictitious boundary, displacement condition, numerical manifold method, crack propagation

1 引言

钢筋混凝土结构的耐久性损伤与破坏一直是土木工程界十分关注的问题,其钢筋锈蚀膨胀引起混凝土结构损伤与裂缝扩展机理始终是这一领域研究的热点^[1~5],如:1991年刘西拉等提出了“混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算”,1996年张誉等提出了“混凝土胀裂时钢筋锈蚀量的确定”等等。本文在现有成果和现场取样检测的基础上,重点从定量的角度研究了混凝土结构锈胀引起的损伤及其裂纹扩展的规律。这里研究的关键是给出了钢筋锈蚀层的形状模型和它相应的虚拟边界位移解和虚拟边界应力解。这二组解

可作为任意的数值方法如有限元法、数值流形元法等等的边界条件。本文最后运用虚拟边界位移解和数值流形元法模拟了二类锈胀随服役时间变化引起裂纹扩展轨迹的问题,其模拟结果与实验结果相吻合。本文的研究可直观仿真裂纹扩展轨迹,对钢筋混凝土结构的耐久性问题定量分析提出了一种有效的方法供参考。

2 取样检测分析

在测试部位墙面每隔 1cm,用冲击钻(直径 13mm)对混凝土进行取样;另外,对钢筋锈层及混凝土骨料进行取样。

从泵房混凝土墙面中钢筋锈蚀直观取样检测,有

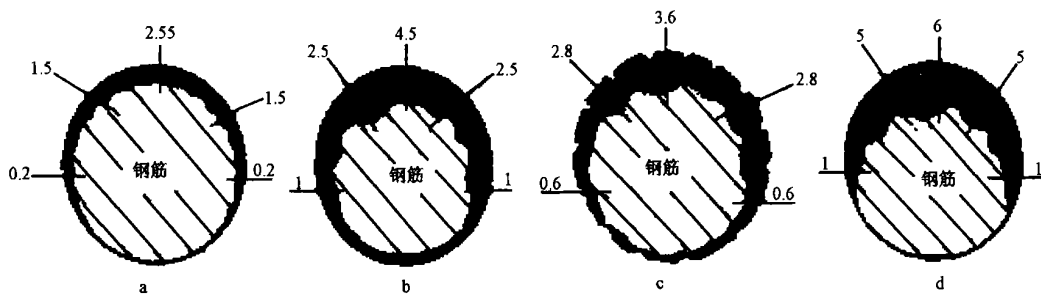


图1 钢筋锈蚀形状示意图 (单位: mm)

Fig 1 Shape of reinforcement corrosion (mm)

三种变化特征尤为重要: ①混凝土表面颜色变化特征; ②锈蚀形状变化特征; ③混凝土表面裂纹宽度变化特征。

形状变化: 钢筋锈蚀后, 取样检测发现其形状一般并不呈圆形, 大致呈以下几种形态: 一般先是距离混凝土表面较远处先发生锈蚀, 之后随着时间增加锈蚀向深处发展, 当混凝土保护层较薄, 裂缝宽度在 0.3mm 以上时, 可能在剩余钢筋表面出现不规则锈蚀坑; 裂缝宽度大于 0.8mm 时, 锈蚀较多和较厚。钢筋锈蚀后其锈蚀产物与钢筋剩余面积关系见图 1 所示。在图 1 中, (a)一般发生在钢筋锈蚀量较小时, 即混凝土保护层表面呈浅黄褐色, 也就是说锈蚀已产生但其裂纹还没有发展到外表面; (b)和 (c)为发生在钢筋已被较多地腐蚀掉即混凝土保护层面呈黄褐色, 其表面有大于 1.0mm 宽度的裂纹产生。(d)主要发生在角区一边有保护层或两边有保护层的情况, 其判断原则同上。图中涂黑部分表示锈蚀层, 打斜线表示钢筋; 图中数字为量测的某些钢筋锈层厚度示意图。

裂纹宽度变化: 钢筋锈蚀量小时, 混凝土保护层不开裂; 锈蚀达到一定程度时, 由于锈蚀产物体积膨胀将造成混凝土保护层开裂。在一定范围内锈蚀量越大, 裂纹宽度也越大, 当锈蚀发展较严重时, 混凝土保护层表面将出现数条裂缝, 其中有一至二条主裂缝。主裂缝与锈蚀量呈现共同增长趋势, 主裂缝走向与钢筋在混凝土中延长方向一致。

3 钢筋锈蚀层轮廓线模型

从实际检测发现, 钢筋混凝土中的钢筋锈蚀都是沿钢筋延伸方向锈蚀, 产生的纵向裂缝也是沿钢筋延伸方向。对这种钢筋混凝土锈蚀问题分析, 可按平面假定进行处理。

另外从图 1 现场取样检测可知, 钢筋锈蚀层形状的外边轮廓线近似于椭圆形状, 靠近保护层越近一边

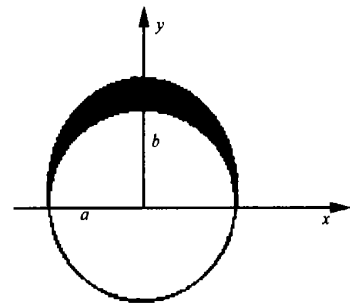


图2 椭圆外轮廓线数学模型

Fig 2 Numerical model of the ellipse contour line

其锈蚀量越大, 而在钢筋下半圆锈蚀层相对很少。通过分析可取图 2 所示椭圆轮廓线形状数学模型。这个轮廓曲线方程可表为 $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ 。这里 a 为椭圆短轴, b 为椭圆的长轴。从这个椭圆方程看出, 短轴 a 为内圆即为已知, 因为它是钢筋直径, 只要能求出长轴 b , 则曲线上任一点的坐标就为已知, 当然任一点锈蚀层厚度也就可以确定。

根据图 2 数学模型, 通过分析可知, 阴影部分(即锈蚀层)的面积 A 一方面可按锈蚀量计算公式计算^[3], 在这个公式中取单位厚度的锈蚀量, 即为平均面积; 另一方面也等于半椭圆面积减去内半圆钢筋的面积, 即有 $A = (\pi/2) ab - (\pi/2) a^2$ 。由上述两因素可求出椭圆长短轴的差为:

$$\Delta b = b - a = \frac{2}{\pi a} Q_t \quad (1)$$

式中: $A = Q_t$, Q_t 为单位厚度 t 时刻平均锈蚀量, 这锈蚀量计算公式见参考文献[5]。

又因为椭圆任一点的曲线坐标为 (x, y) , 内圆钢筋任一点的曲线坐标为 (x, y_1) , 则该点锈蚀层厚度为:

$$\Delta y = y - y_1 = \Delta b \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (2)$$

式中 $\Delta b = b - a$, 为长轴方向锈蚀层厚度。

最后将式 (1) 代式 (2), 可求得任一点锈蚀层厚度的计算公式为

$$\Delta y = \frac{2}{\pi a} Q_t \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (3)$$

从公式 (3) 可知, 只要求出 t 时刻的单位厚度平均锈蚀量 Q_t , 就可求出这一时刻任一点锈蚀层厚度的大小。另外从式 (2) 也可知, 当通过实际取样检测知道锈蚀层长轴方向的厚度 Δb 时, 同样从式 (2) 也可以求出任一点锈蚀层厚度。上述两种方法被分别命名为理论计算法和实际测试计算法。

4 虚拟边界位移模型

由大量试验可知, 对于图 2 平面问题钢筋锈蚀的几何形状和厚度是随混凝土受碳化时间的长短而变化。一般混凝土中的钢筋为圆形, 锈蚀层可简化成椭圆外轮廓。如果在任一大平面内设置有钢筋, 经过 t 时刻的环境碳化引起钢筋周边产生锈蚀层 D , 该层的厚度随 t 的增加而增厚。这种锈蚀物的体积增大, 必然使钢筋周围的混凝土产生相当大的变形和膨胀力, 结果必然导致混凝土裂纹和破坏。

从上述分析可知, 锈蚀层 D 一方面受到混凝土碳化的影响, 另一方面还要受到结构的力学作用。由于混凝土碳化产生锈蚀层的计算已由式 (3) 给出, 因此本研究的关键在于从定量上解决锈蚀层对结构力学作用的结果。在具体分析之前首先作如下假定:

1) 在任一 t 时刻, 钢筋锈蚀层 D 的长度和厚度为常数, 这样动态问题可按静态问题处理。

2) 在任一时刻, 把锈蚀层对结构的作用看成为虚拟边界位移直接作用在结构上。然后再把锈蚀层作为虚拟边界位移中的夹层。在一般情况下, 由于这种夹层刚度很小, 可忽略不计。

3) 钢筋锈蚀层位移 D 可以看成由 n 个足够小的虚拟矩形位移单元 D_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 组成, 这样可以保证用不同厚度的矩形单元来逼近原锈蚀层曲线, 同时每个单元位移 D_i 可按现有碳化产生锈蚀层的计算公式 (3) 计算。

根据上述的三个基本假定, 图 2 可离散为图 3 所示数值模型。图 3 表示锈蚀层 D 被离散化 n 个虚拟位移矩形单元, 每个单元首尾相连, 分别以虚拟边界位移单元的形式作用在边界上。在区域内任一点的坐标为 x, y , 在虚拟边界位移上的坐标为 s, n 。

针对图 3 数值离散化模型, 在图 3 中 j 单元上作用有虚拟位移, 由于它在边界坐标上, 这个虚拟位移量可定义为:

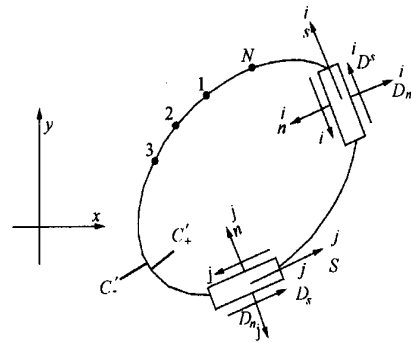


图 3 虚拟边界位移离散化学模型

Fig. 3 Discontinuous mechanistic model of fictitious boundary displacement

$$\left. \begin{aligned} D_s &= \left. \begin{aligned} &u_s^- - u_s^+ \\ &D_n = \left. \begin{aligned} &u_n^- - u_n^+ \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

在式中, u_s^- 和 u_s^+ 为 j 单元切向和法向上的位移, 正号和负号是对应在虚拟边界的内区域和外区域。显然从式 (4) 可以看出虚拟边界位移是不连续位移, 其中锈蚀层可看成不连续位移中的夹层。上述单元的规定方向和边界坐标方向的定义是对外域而言的, 若求解的问题是内部问题, 则上面的规定正好相反。

对图 3 数值解可按边界元法中虚拟位移法的迭加原理处理即每个单元上的位移都对观察点 i 单元产生影响给出, 则该单元上的切向和径向位移和应力可分别为:

$$\left. \begin{aligned} u_s^i &= \sum_{j=1}^N B_{sj}^i D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{sn}^i D_n^j \\ u_n^i &= \sum_{j=1}^N B_{ns}^i D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{nn}^i D_n^j \end{aligned} \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5a)$$

和

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s^i &= \sum_{j=1}^N A_{ss}^i D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^i D_n^j \\ \sigma_n^i &= \sum_{j=1}^N A_{ns}^i D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^i D_n^j \end{aligned} \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5b)$$

式中, B_{ss} 等是位移影响系数, A_{ss} 等为应力影响系数。这些影响系数可按无限大平板内作用单位径向法向位移的基本解, 可通过坐标变换求得^[9]。

在实际中, 钢筋锈蚀主要是沿钢筋径向产生影响而切向影响很小即 $D_s = 0$ 则式 (5a) 和 (5b) 可简化为:

$$\left. \begin{aligned} u_s^i &= \sum_{j=1}^N B_{ns}^i D_n^j \\ u_n^i &= \sum_{j=1}^N B_{nn}^i D_n^j \end{aligned} \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6a)$$

和

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \sum_{j=1}^N \overset{j}{A}_{sn} \overset{j}{D}_n \\ \sigma_n &= \sum_{j=1}^N \overset{j}{A}_{mn} \overset{j}{D}_n \end{aligned} \right\} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (6b)$$

式中 $\overset{j}{D}_n$ 可定义为 j 单元混凝土碳化引起的锈蚀层厚度, 可直接按公式 (3) 计算, 即在 τ 时刻, 单位长度钢筋锈蚀层厚度为

$$\overset{j}{D}_n = \Delta y = \frac{2}{\pi a^2} Q_t \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (7)$$

式中:

$$Q_t = 41.9 V_0 R / \alpha A_n \int_0^t [1 / (K_e t - X_0) \arccos(R + C_e - K_e t) / R] dt$$

这锈蚀量计算公式中符号的含义见参考文献[5]。

由于式 (6a) 中 $\overset{i}{u}_s$ 和 $\overset{i}{u}_n$ 就是要求的虚拟边界位移解, 而式 (6b) 中 $\overset{i}{\sigma}_s$ 和 $\overset{i}{\sigma}_n$ 就是要求的虚拟边界应力解。这两组解不仅考虑了混凝土碳化对锈蚀层的影响, 而且同时考虑了结构的作用。用这两组解求钢筋混凝土锈胀问题的边界位移和应力成为现实。另外需要说明的是这两组边界条件的任选一组都可作为该问题的已知边界条件, 适用于各种数值方法如有限元法、数值流形元法等等。为了直观性, 本文重点采用虚拟锈蚀边界位移条件下, 用数值流形元法模拟二类锈胀随时间变化引起裂纹扩展轨迹的问题。

5 应用算例

在实际中混凝土的钢筋锈蚀膨胀问题一般有二种情况: 一种为一般边钢筋锈蚀引起裂纹扩展如算例 1 所示; 另一种为角区钢筋锈蚀引起裂纹扩展, 见算例 2 所示。在具体模拟中, 认为混凝土中钢筋径向的刚度很大, 这样它可视为刚体。由此在数值离散中钢筋周边每个单元钢筋锈蚀层随时间 t 发展变厚时, 则单元结点产生相应变形。又由于钢筋周边单元固定为刚体, 因此锈蚀层的膨胀只能沿单元结点的外方向变形即产生位移边界条件, 从而达到本问题的受力模拟效果。

算例 1, 一般边钢筋锈蚀膨胀引起裂纹扩展的模拟。已知钢筋直径为 d , 混凝土平面尺寸为 $a=b=3d$, 弹性模量 $E=2.0 \times 10^4 \text{MPa}$, 泊松比 $\nu=0.2$ 。另外数值单元总数 1046, 节点数 569, 钢筋周边约束数 68 个, 其中 21 个随时间 t 的变化产生位移锈蚀层。根据公式 (7) 计算, $t=3y$ 时刻的初始位移锈蚀层见表 2 所示。由于本问题的对称性, 在表 2 中只取一半数字。为了节省计算时间最后给出 3y、6y 和 9y 裂纹

扩展计算结果, 见图 4~图 6。

算例 2, 角区钢筋锈蚀膨胀引起裂纹扩展的模拟。已知条件与算例 1 相同, 其中单元结点约束只有 15 个产生位移锈蚀层, 其 $t=3y$ 时刻的初始位移计算结果见表 1 所示。最后给出本问题 3y、6y 和 9y 裂纹扩展的计算结果, 见图 7~图 9。

(1) 由算例 1 可知, 一般边钢筋锈蚀膨胀引起裂纹扩展的轨迹象个漏斗形; 从算例 2 可看出角区钢筋锈蚀引起裂纹扩展的轨迹象个三角形。这二种轨迹的形状与试验结果^[4]相符合, 由此可以说明本方法的模拟是可行和有效的。

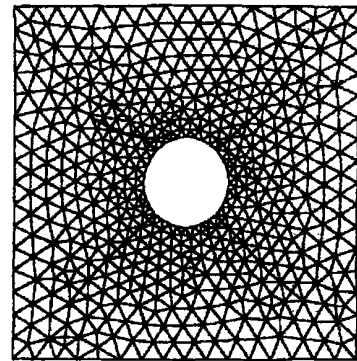


图 4 ($t=3y$) 裂纹扩展
Fig 4 Crack propagation ($t=3y$)

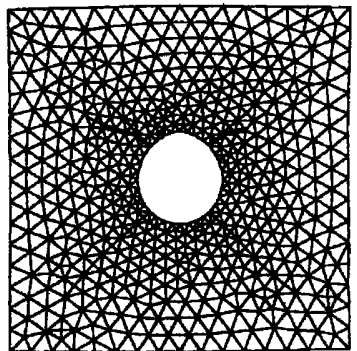


图 5 ($t=6y$) 裂纹扩展
Fig 5 Crack propagation ($t=6y$)

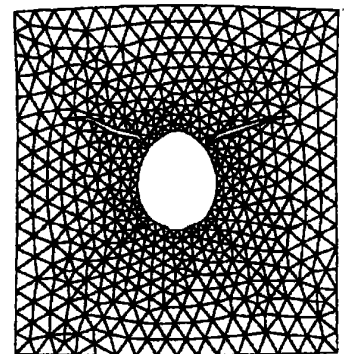


图 6 ($t=9y$) 裂纹扩展
Fig 6 Crack propagation ($t=9y$)

表 1 单元结点初始位移锈蚀层厚度 (mm)
Table 1 Corroding degree of concrete by sense judgment

一般边钢筋锈蚀问题											
单元节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
坐标 (y)	0.0	0.11	0.15	0.18	0.20	0.22	0.23	0.24	0.248	0.252	0.254
角区钢筋锈蚀问题											
单元节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
坐标 (x, y)	0.000	0.11	0.13	0.15	0.18	0.225	0.241	0.254			

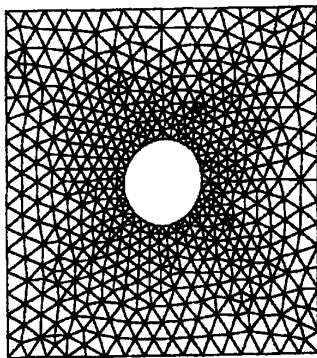


图 7 ($t=3y$) 裂纹扩展

Fig 7 Crack propagation ($t=3y$)

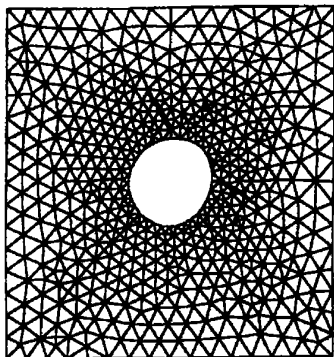


图 8 ($t=6y$) 裂纹扩展

Fig 8 Crack propagation ($t=6y$)

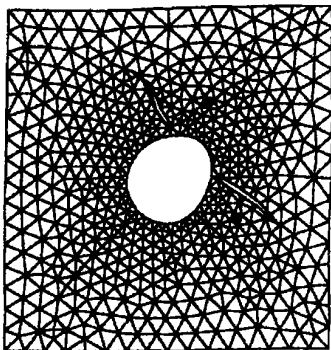


图 9 ($t=9y$) 裂纹扩展

Fig 9 Crack propagation ($t=9y$)

(2) 由这二个算例也可看出, 裂纹的扩展受锈蚀层厚度和服役时间的影响很大, 一般时间越长, 裂纹的宽度和长度也相应越大, 这些特点是符合实际的。

(3) 本方法不仅可以模拟单裂纹扩展, 而且还可以模拟二个以上的多裂纹扩展问题。

总之, 本文把数值流形和虚拟边界层法相结合, 可直观、形象和有效地模拟锈胀引起裂纹扩展轨迹的方向、宽度和长度大小。这对进一步搞清混凝土结构的碳化损伤机理及其耐久性问题, 提供了一条新的研究途径, 是很有实际意义的。

参 考 文 献

[1] 刘西拉, 苗澎柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算 [J]. 土木工程学报, 1990, 23 (4)

[2] 屈文俊, 张誉等. 混凝土胀裂时钢筋锈蚀量的确定 [A]. 国家攀登计划重大土木工程与水利工程安全性和耐久性的基础研究中‘钢筋锈蚀预测模型年度报告’ [C], 1~13 1996

[3] 惠云玲. 混凝土结构钢筋锈蚀耐久性损伤评估及寿命预测方法 [J]. 工业建筑, 1997, 27 (5)

[4] 王娴明, 赵宏延. 一般大气条件下, 钢筋混凝土结构构件剩余寿命的预测 [J]. 建筑结构学报

[5] 李永和, 葛修润. 锚喷结构中钢锚杆锈蚀量的估计分析 [J]. 煤炭学报, 1998, 23 (1)

[6] 李永和. 锚喷结构锈蚀开裂前钢锚杆锈蚀量的计算公式及其分析 [J]. 西安公路交通大学学报, 1997, (4)

[7] Li Yonghe, Ge Xiuru. Model and reliability analysis for carbonation damage of shotcrete-bolt structure [A]. In: Pro of 9th Inter Con on Computer methods and advances in geomechanics [C]. Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 1997

[8] Li Yonghe. Changing carbonation models of shotcrete-bolt structure along with time [A]. Pro of the 7th Inter Con on EPMESC [C]. The South China University Technology, Guangzhou, 1997

[9] Crouch S L and Starfield A M. Boundary element methods in solid mechanics [M]. London George Allen & Unwin 85 ~ 90, 1983

李永和 工学博士, 教授, 博士生导师, 上海大学土木工程系主任, 主要从事结构工程与岩土工程方面的教学与科研工作。

通讯地址: 200072 上海市延长路 149 号上海大学土木工程系

葛修润 教授, 中国工程院院士, 长期从事岩土工程方面的教学与科研工作。