

Summary of Numerical Simulation Methods for the Influence of Rebar Corrosion on Concrete Cracking

Guoqin Dou¹ Zongfeng Sun¹ Peng Lou^{1,2}

1.Beijing IWHR Corporation, Beijing, 100048, China

2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100048, China

Abstract

The research on concrete cracking caused by steel corrosion is reviewed, and the results of related research are summarized from the perspective of numerical simulation. The actual situation of the obtained non-uniform distribution of steel corrosion is used as the displacement load input of the finite element analysis, and the corrosion cracking process of the non-uniformly corroded concrete components can be simulated. Considering the mutual influence between the cross-sections of concrete after cracking, the numerical simulation of concrete cracking should be developed from the original two-dimensional model with circular holes in the concrete to the three-dimensional model.

Keywords

concrete structures; numerical models; steel corrosion; cracking

钢筋锈蚀对混凝土开裂影响的数值模拟方法综述

窦国钦¹ 孙宗峰¹ 娄鹏^{1,2}

1. 北京中水科工程集团有限公司, 中国·北京 100048

2. 中国水利水电科学研究院, 中国·北京 100048

摘要

对钢筋锈蚀引发混凝土开裂的研究进行了综述,从数值模拟角度总结了相关研究的成果。将获取的钢筋锈蚀非均匀分布的实际情况,作为有限元分析的位移荷载输入,可对非均匀锈蚀混凝土构件锈裂过程进行模拟。考虑混凝土开裂后的截面间相互影响,混凝土锈裂的数值模拟应从原常用的混凝土内部带圆孔的二维模型向三维模型发展。

关键词

钢筋锈蚀; 数值模拟; 混凝土结构; 开裂

1 研究背景

在影响混凝土结构耐久性的众多因素中,钢筋锈蚀引起的混凝土结构开裂被认为是钢筋混凝土结构耐久性失效的最主要原因之一。混凝土结构在服役过程中,环境中的有害介质侵入到混凝土内部,破坏钢筋表面的钝化膜,引发钢筋锈蚀和铁锈膨胀,锈蚀产物的体积是原有体积的2~4倍,其体积膨胀行为受到周围混凝土的限制,在钢筋/混凝土界面上产生压力,即钢筋锈胀力,随着钢筋锈蚀量的增加,逐渐增大的钢筋锈胀力将导致混凝土保护层受拉而开裂。锈胀裂缝首先在钢筋周边的混凝土内界面产生,由内而外逐渐扩展;当锈胀裂缝贯通混凝土保护层时,环境中的有害介质经锈胀裂缝直接侵入混凝土内部,接触到钢筋,钢筋锈蚀速度大大加快,进一步加剧混凝土锈胀裂缝的扩展,甚至导致混

凝土保护层剥落,严重影响混凝土结构的耐久性。

混凝土保护层锈裂过程对混凝土结构的性能劣化规律和使用寿命有着重要的影响,众多中国和其他国家的学者开展了相关研究工作,取得了一系列研究成果。但是建立于大部分实际混凝土工程中的非均匀钢筋锈蚀理论模型,是一项具有挑战性的工作。至今,仍未见能被广泛接受的非均匀钢筋锈胀力作用下的混凝土锈裂模型。而有限元方法则是解决非均匀钢筋锈蚀情况的有利工具。

论文从数值模拟这个方面对钢筋锈蚀引起混凝土结构锈胀开裂的研究成果进行综述,也对该领域尚待深入研究的内容进行讨论。

2 研究现状

钢筋锈蚀影响混凝土开裂三阶段理论:对于混凝土结构的锈胀开裂过程,锈裂三阶段理论^[1,2]得到大部分学者的认可,即从混凝土构件钢筋脱钝到混凝土保护层开裂,大致要经历如下3个阶段(见图1)。

【作者简介】窦国钦(1983-),男,中国北京人,博士,中级工程师,从事混凝土检测和水库大坝安全鉴定研究。

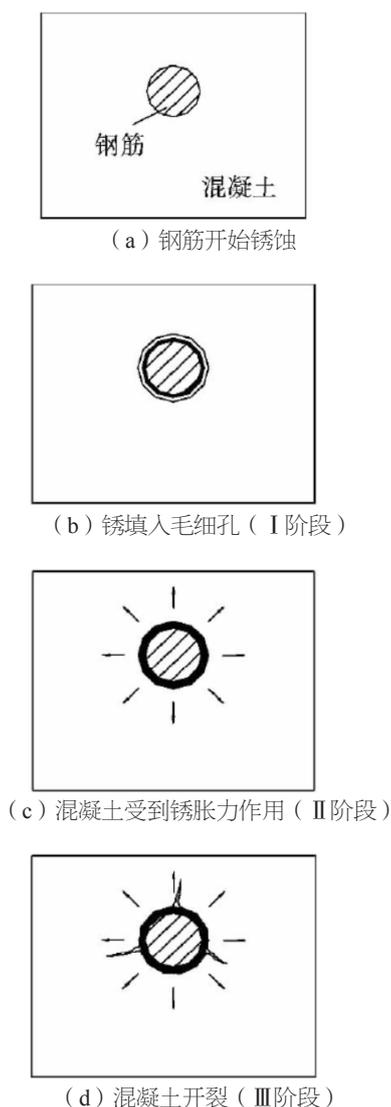


图 1 钢筋锈蚀混凝土开裂阶段

①铁锈自由膨胀阶段。钢筋脱钝开始锈蚀后，产生的铁锈首先填入毛细孔和空隙中。在铁锈填满空隙之前，不会对外围混凝土产生钢筋锈胀力。

②混凝土保护层受拉应力阶段。当铁锈填满钢筋与混凝土交界面毛细孔后，钢筋进一步锈蚀产生的铁锈将对外围混凝土产生钢筋锈胀力，从而使得混凝土保护层受到拉应力，且该拉应力随着钢筋锈蚀的发展而增大。

③混凝土保护层开裂阶段。当钢筋锈蚀深度达到一定值时，混凝土保护层在钢筋表面附近首先出现裂缝，裂缝随着钢筋锈蚀的发展逐渐开展到混凝土表面。此阶段产生的铁锈使得混凝土保护层中的裂缝不断开展，同时也会逐渐填充到开展的裂缝中。

根据这三阶段理论，采用有限元方法模拟钢筋锈裂过程主要有以下几个：

① Dagher 等^[3]采用有限元方法，对钢筋锈蚀产物体积

膨胀引起混凝土结构锈裂损伤的过程进行模拟，并采用弥散裂缝和节点位移方法加载，模拟各种钢筋锈蚀。该数值模型可以很好地帮助理解混凝土锈裂过程。

② Molina 等^[4]建立了有限元模型，对 4 个混凝土试件的锈裂试验过程进行模拟。该模型采用弥散裂缝模拟混凝土裂缝开展行为，还采用改变锈蚀界面钢筋弹性模量的方法对铁锈也加以考虑。该有限元模型和试验结果较为符合。此外，还利用该模型讨论了混凝土锈裂的影响因素。

③张伟平^[5]采用温度膨胀环模拟锈蚀产物，对混凝土中钢筋的锈胀损伤机理进行有限元分析，根据分析结果提出了混凝土保护层锈胀开裂时刻的钢筋截面锈蚀率模型。

④ Zhou 等^[6]采用有限元方法，分析了钢筋锈蚀引起混凝土桥面板的锈裂行为，并利用该有限元模型讨论了混凝土桥面板不同锈裂失效模型的控制因素（包括几何尺寸、钢筋位置等）。

⑤ Val 等^[7]利用二维平面带孔洞的有限元模型研究了铁锈在自由膨胀阶段的填充量，并利用开裂时刻锈蚀量的试验值与有限元模拟得到的结果之差来反映铁锈填充的大小。

⑥ Saouma 等^[8,9]基于均匀的环向节点位移，采用如下 3 组不同的加载方式、不同预设开裂路径的方法，模拟了钢筋锈胀开裂的过程（见图 2）。

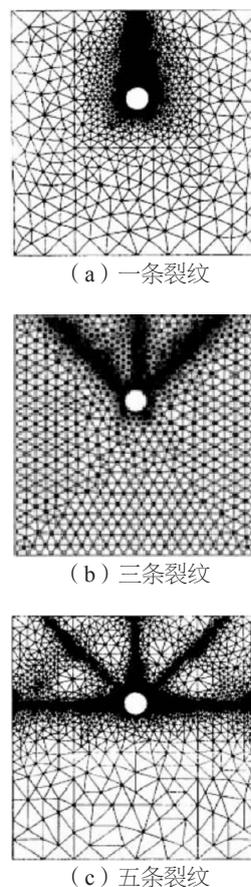


图 2 三种预设的钢筋锈蚀混凝土开裂路径

⑦ Shaikh 等^[10]对 3 种钢筋混凝土梁进行了锈胀开裂的试验研究和数值模拟。结果表明,当普通钢筋混凝土梁的钢筋截面损失率达到 1.5% 时,混凝土保护层表面会出现锈胀裂缝;当钢筋截面损失率达到 3% 时,混凝土保护层将剥离。

⑧ Du 等^[11]在数值模拟的过程中考虑到了非均匀锈蚀的情况,采用如图 3 所示的 2 种不同加载方式来分别模拟均匀锈蚀和非均匀锈蚀,其中非均匀锈蚀径向位移分布是假设的。按照图 3 (b) 所示的分布形式,环向最大位移与最小位移之比为 5。模拟结果表明:内裂仅取决于钢筋直径和膨胀应力,而与钢筋的锈蚀类型和保护层厚度无关;混凝土保护层的外裂仅与保护层厚度有关,而且发生在保护层最薄的地方;贯通裂缝与保护层厚度与钢筋直径之比呈线性关系;非均匀锈蚀导致混凝土保护层开裂时的锈蚀量比非均匀锈蚀早,因此实际工程中的点蚀现象比均匀锈蚀对钢筋混凝土构件的威胁更大。

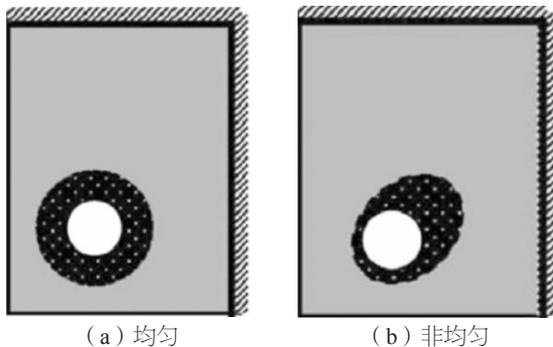


图 3 两种不同锈蚀情况

⑨ Jang 等^[12]利用数值模拟的方法着重研究了非均匀锈蚀导致的混凝土开裂情况,非均匀锈蚀的锈层分布形态是从锈峰处线性递减的。通过调整不同的荷载分布、模型的材料参数和几何尺寸,得出了混凝土保护层表面开裂时刻钢筋锈胀力与钢筋表面锈蚀范围对应的圆心角、钢筋直径、保护层厚度与钢筋直径之比以及混凝土抗拉强度之间的关系。

⑩ 夏宁等^[13]在假设锈蚀产物仅沿钢筋断面径向发生膨胀的前提下,提出钢筋圆孔边任意一点的锈胀位移公式,根据公式,得到钢筋表面锈蚀轮廓线的变化情况见图 4,其中为锈蚀厚度系数。

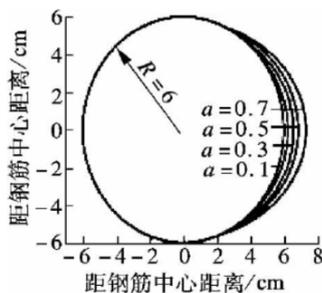


图 4 钢筋表面锈蚀轮廓线

⑪ Zhao^[14, 15]等根据钢筋锈蚀试验研究得到的沿钢筋周边非均匀锈层厚度 T_r 的分布模型:

$$T_r = \frac{a_1}{a_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \left(\frac{\varphi - \pi}{\sqrt{2} a_2} \right)^2 \right] + a_3$$

式中,为钢筋周围的极坐标, a_1 , a_2 , a_3 分别为钢筋锈蚀层的非均匀系数、扩展系数和均匀系数。利用该式作为有限元模型中位移荷载分布的依据,对锈蚀钢筋混凝土试件进行有限元分析,研究非均匀锈蚀膨胀过程。得到钢筋非均匀锈蚀导致的周围混凝土的应力场分布状态、锈胀裂缝开展与分布状况、钢筋与混凝土界面锈胀力等试验方法无法测得的结果。有限元分析结果中的试件锈裂图和实际混凝土试件锈裂情况对比见图 5。

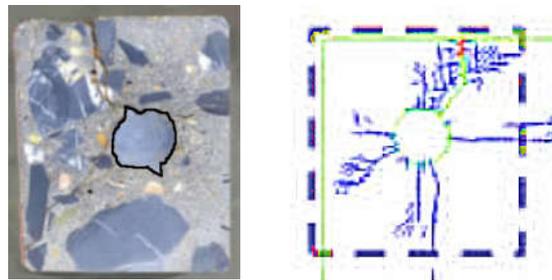


图 5 混凝土试件实际锈裂图与数值模拟结果对比

此外, kim 等、Tran 等、Guzman 等及 Ozbolt 等采用了更为复杂的数值模型来研究钢筋锈蚀膨胀引起的保护层混凝土开裂行为。然而,这些数值研究工作将混凝土看作宏观均匀材料,即假定整个分析区域中混凝土力学、渗透和扩散性质是相同的。实际上,混凝土宏观力学行为及破坏模式由其细 / 微观结构决定,故而数值计算中需要考虑混凝土内部结构的非均质特性。

近年来, Pan 等考虑非均质性的影响,对饱和混凝土的化学扩散及钢筋锈蚀引发的混凝土开裂行为进行了数值模拟。Savija 等采用细观格构模型 (Lattice model) 对钢筋混凝土锈胀破坏机理进行了初步的研究,分析了厚径比、钢筋位置等对混凝土保护层破坏模式的影响,获得典型的破坏模式如图 6 所示,进而在该细观分析方法的基础上研究了厚径比及钢筋位置等对保护层破坏模式的影响。混凝土破坏过程与其微 / 细观结构关联, Du 和 Jin 从细观角度出发,建立了钢筋锈蚀膨胀诱发的保护层混凝土开裂破坏行为模拟的数值分析模型。该模型中,钢筋的锈胀以强制锈蚀位移形式直接施加在洞口 (即为钢筋占据的位置) 处。进而在该细观数值方法的基础上,研究了钢筋均匀锈蚀膨胀对保护层混凝土开裂破坏模式及保护层开裂时的临界锈蚀率的影响规律。考虑到钢筋非均匀锈蚀行为的影响, Du 等及 Jin 等将该细观力学分析模型进行了扩展和应用,建立了钢筋混凝土非均匀锈蚀膨胀的分析模型。图 7 即为 Du 等采用的细观尺度数值

分析方法获得的模拟结果与相关试验结果及宏观尺度模拟结果的对比。相比于宏观尺度模型,该细观尺度模型能更好地与试验结果吻合,更好地表现保护层中裂纹扩展路径的曲折性。

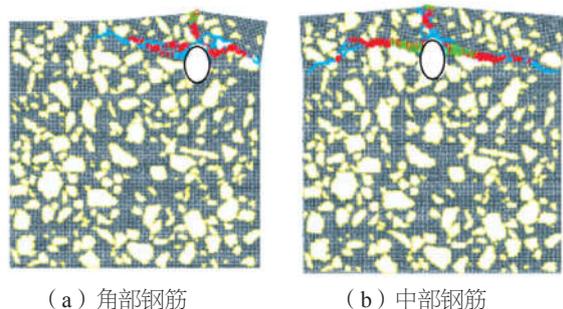


图6 角部和中部钢筋锈胀致保护层破坏

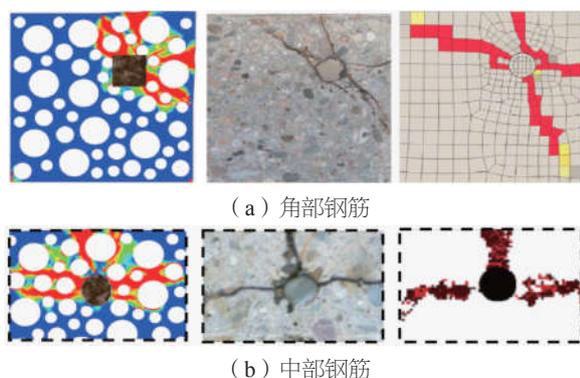


图7 细观数值结果与试验及均匀模型结果的对比

为了得到保护层因钢筋锈胀力产生的力学响应和裂缝开展状况,许多研究中利用了有限元分析方法,通过虚拟的内部压力或径向位移来模拟锈胀力,大部分非均匀锈蚀模型中都采用了假设的非均匀荷载/位移分布形式。应该看到,若采用的假设非均匀荷载分布与实际情况不一致,有限元模型得到混凝土锈裂模型的准确性也是令人质疑的。因此,钢筋与混凝土交界面上钢筋锈胀力的正确模拟,是实现混凝土锈裂过程数值模拟的关键所在。只有按照钢筋锈蚀产物真实的非均匀分布来模拟锈胀力荷载,才能得到锈蚀钢筋周围混凝土的应力场和裂缝开展状态等情况的合理描述。在后续的有限元模拟混凝土锈裂过程中,应考虑钢筋锈蚀非均匀分布的实际情况,将其作为位移荷载输入,以得到更符合实际情况的混凝土锈裂数值模型。

3 研究展望

为推进钢筋锈蚀引起混凝土结构锈裂研究的发展,下述研究内容尚待深入:

①完善钢筋非均匀锈蚀分布模型。目前几乎所有的数值模拟都是建立在均匀锈蚀膨胀为假定前提,在混凝土结构锈裂分析模型中,不但要考虑钢筋总锈蚀率,同时还应考虑

锈蚀产物沿钢筋圆周的分布,即钢筋非均匀锈蚀分布情况。目前尚没有成熟的钢筋非均匀锈蚀分布模型来指导数值模拟分析。

②考虑铁锈填充区的定量研究。目前对于混凝土构件锈裂过程中铁锈填充行为的研究并不多见,尤其缺少定量的研究成果。如何建立铁锈填充区域和锈层积累之间的定量关系,还需要大量的数值模拟与试验研究工作。

③荷载与环境耦合作用的考虑。现有的混凝土锈裂研究中,大多仅考虑钢筋锈蚀引起混凝土保护层锈裂,这与实际情况是不符合的。在后续的混凝土锈裂数值模拟中,应同时考虑环境与荷载的耦合作用。

④目前混凝土锈裂有限元模拟基本采用混凝土内部带有圆孔的二维模型。利用该模型可以简化数值模拟,节省计算时间,同时可以在一定程度上较好地模拟锈胀裂缝由内而外的发展和裂缝开展过程。但是,二维模型无法考虑截面间的相互影响,也无法分析混凝土锈裂开展后的剥落情况。因此,混凝土锈裂的有限元模拟应从二维模型向三维模型发展。

4 结语

①目前建立的混凝土锈胀开裂理论模型可以较好地描述理想圆柱体钢筋混凝土试件在均匀钢筋锈胀力作用下的锈裂行为。但是,对于实际工程中更常见的钢筋非均匀锈蚀、受荷载作用的混凝土结构锈裂情况,还尚未建立完善的预测模型。

②有限元软件是研究混凝土锈胀开裂的一种有效手段,在获取钢筋锈蚀非均匀分布的实际情况下,以此作为位移荷载输入,是实现混凝土锈裂过程正确模拟的关键所在。考虑混凝土开裂后的截面间相互影响,混凝土锈裂的数值模拟应从原来常用的混凝土内部带圆孔的二维模型向三维模型发展。

参考文献

- [1] Liu Y P, Weyers R E. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete Structures[J]. ACI Material Journal, 1998, 95(6): 675-681.
- [2] 赵羽习,金伟良. 钢筋锈蚀导致混凝土构件保护层胀裂的全过程分析[J]. 水利学报, 2005, 36(8): 939-945.
- [3] Dagher H J, Kulendran S. Finite element modeling of corrosion damage in concrete structures[J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(6): 699-708.
- [4] Molina F J, Alonso C, Andrade C. Cover cracking as a function of rebar corrosion: part 2-numerical model[J]. Mater Struct, 1993, 26(9): 532-548.
- [5] 张伟平. 混凝土结构的钢筋锈蚀率损伤预测及其耐久性评估[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 1999.

(下转第138页)