

检查钢筋混凝土结构的开裂和破碎行为的有限元建模策略

金城嘉, 亚历山大·戈登

隶属机构: 瑞典建筑与土木工程系

摘要: 钢筋混凝土 (RC) 结构的非线性有限元 (FE) 分析的特点是众多建模选项和输入参数。为了准确模拟涉及混凝土受拉开裂和受压压碎的非线性 RC 行为, 从业者对关键建模问题做出不同的选择, 例如, 定义混凝土本构关系, 指定混凝土和钢筋之间的粘结, 以及解决相关问题收敛困难和网格敏感性。因此, 必须批判性地审查常见的建模选择, 并制定具有一致性、可靠性和可比性的稳健建模策略。本文基于关键建模选择的参数研究提出了一种建模策略和实用建议, 用于 RC 结构的非线性有限元分析。所提出的建模策略旨在为 RC 构件的弯曲响应提供可靠的预测, 重点是混凝土开裂行为和破碎破坏, 这是更复杂建模案例的基础, 例如, 与纤维增强聚合物 (FRP) 层压板粘合的 RC 梁。此外, 本文全面描述了所提出的建模策略的实施过程, 重点关注 RC 结构的关键建模问题。所提出的策略通过对在四点弯曲中测试的 RC 梁进行有限元分析来证明——一根 RC 梁作为参考, 一根梁在其拱腹处外部粘合有碳 FRP (CFRP) 层压板。模拟结果与关于荷载-变形关系、开裂、混凝土压碎引起的弯曲破坏以及中间裂缝引发的 CFRP 剥离的实验测量结果非常吻合。本文提出的建模策略和建议通常适用于 RC 结构的非线性有限元分析。

关键词: 钢筋混凝土; 有限元分析; 裂纹带; 应变定位; 峰后软化; 粘塑性正则化; 收敛; 网格灵敏度; 粘滑; 弯曲行为

Finite Element Modelling Strategy in Examining Cracking and Crushing Behaviour of Reinforced Concrete Structures

Jincheng Chia, Alexandre Gordon

Affiliation: Department of Architecture and Civil Engineering, Sweden

Abstract: Nonlinear finite element (FE) analysis of reinforced concrete (RC) structures is characterized by numerous modelling options and input parameters. To accurately model the nonlinear RC behaviour involving concrete cracking in tension and crushing in compression, practitioners make different choices regarding the critical modelling issues, e.g., defining the concrete constitutive relations, assigning the bond between the concrete and the steel reinforcement, and solving problems related to convergence difficulties and mesh sensitivities. Thus, it is imperative to review the common modelling choices critically and develop a robust modelling strategy with consistency, reliability, and comparability. This paper proposes a modelling strategy and practical recommendations for the nonlinear FE analysis of RC structures based on parametric studies of critical modelling choices. The proposed modelling strategy aims at providing reliable predictions of flexural responses of RC members with a focus on concrete cracking behaviour and crushing failure, which serve as the foundation for more complex modelling cases, e.g., RC beams bonded with fibre reinforced polymer (FRP) laminates. Additionally, herein, the implementation procedure for the proposed modelling strategy is comprehensively described with a focus on the critical modelling issues for RC structures. The proposed strategy is demonstrated through FE analyses of RC beams tested in four-point bending—one RC beam as reference and one beam externally bonded with a carbon-FRP (CFRP) laminate in its soffit. The simulated results agree well with experimental measurements regarding load-deformation relationship, cracking, flexural failure due to concrete crushing, and CFRP debonding initiated by intermediate cracks. The modelling strategy and recommendations presented herein are applicable to the nonlinear FE analysis of RC structures in general.

Keywords: Reinforced concrete; finite element analysis; crack band; strain localization; post-peak softening; viscoplastic regularization; convergence; mesh sensitivity; bond-slip; flexural behaviour

引言:

有限元 (FE) 分析对于研究钢筋混凝土 (RC) 结构的非线性行为和以比实验测试更低的成本执行参数化研究是有效的。钢筋混凝土构件的非线性有限元分析已被广泛报道, 数值和实验结果之间经常取得良好的一致性。然而, 由于所采用的建模策略不同, 现有有限元模型的比较和应用比较困难, 这涉及到相当多的选择, 例如混凝土本构模型、关键参数、混凝土与钢筋之间的结合力和数值分析程序。用于对简单 RC 结构构件的极限承载力和开裂进行盲目预测的非线性有限元分析有很大的不确定性。

RC 结构非线性有限元分析的主要挑战包括: (1) 定义混凝土拉伸和压缩行为, 并适当考虑断裂区的应变局部化, (2) 有效地指定混凝土之间的适当粘结-滑动行为和钢筋, (3) 解决高非线性混凝土建模中常见的收敛困难, (4) 在推导和定义输入数据时对有限元软件处理逻辑的误解。下文将详细描述这些挑战, 使得 RC 的非线性有限元分析变得复杂且耗时; 因此, 实践工程师很少执行这种非线性分析。

混凝土受拉开裂: 在实际有限元分析中, 受拉混凝土的开裂通常采用离散或涂抹裂缝方法建模。在离散裂缝方法中, 物理裂缝被建模为混凝土连续体中的位移不连续性。虽然它允许精确预测裂纹处的局部变形, 但离散裂缝方法需要在生成有限元时预先定义拉伸断裂区域。然而, 对于大多数结构分析来说, 裂缝的位置事先是未知的。为了克服这一限制, 需要自动重新划分网格技术, 以根据裂纹扩展来调整有限元的配置。尽管最近的研究一直致力于开发允许任意裂纹萌生和扩展的离散裂缝模型, 但复杂的建模方法不适合工程从业者的实际应用。应用的简便性促使涂抹裂缝方法在实际有限元分析中得到广泛使用。在涂抹裂缝方法中, 裂缝宽度转化为涂抹在一定长度上的等效开裂应变。只有当模拟裂缝过程区的宽度等于假定的涂抹长度时, 数值结果才符合实际情况。为保证数值结果的可靠性, 应适当确定涂抹长度, 并将其纳入受拉混凝土本构律的定义中。

混凝土受压破碎: 单轴受压混凝土的本构模型通常在设计规范 (例如模型规范和 ACI 318) 中以应力-应变关系的形式提供。但是, 例如压缩应变, 即获得的“平均应变”通过在标准试样的长度上涂抹测量的变形, 不能描述混凝土临界断裂损伤区的局部应变软化行为。自 1980 年代以来的研究已经调查了应变局部化对推导混凝土压缩本构模型的影响。在有限元分析中考虑应变局部化时面临的挑战是模拟断裂带的实际大小事先不知道, 但必须确定并使用它来修改混凝土的本构模型作为有限元分析的输入数据。Zandi Hanjari 等人修改了 Thorenfeldt

等人提出的应力-应变关系的峰值后分支, 假设在 RC 构件的有限元分析中混凝土压碎发生在一行混凝土单元中。为了正确定义混凝土受压行为并可靠地预测受混凝土压碎控制的 RC 构件的承载力, 有必要 (1) 阐明考虑应变局部化的混凝土受压本构模型的修改原则, 以及 (2) 开发实用的确定断裂带大小的方法。

混凝土和钢筋之间的粘结-滑动行为: 在 RC 结构的非线性有限元分析中, 混凝土和钢筋之间的粘结-滑动行为的定义对于准确预测结构响应、裂缝模式和裂缝至关重要宽度。然而, 缺乏指导方针, 文献中使用不同的方法来分配钢-混凝土相互作用, 需要不同的输入数据和解决方法来克服实施困难, 这些实施困难通常没有详细描述。因此, 对于研究界来说, 重要的是评估现有的分配键滑行为的方法, 并开发涉及简单应用程序的新方法。

收敛困难: 开裂或破碎混凝土的软化行为和刚度退化导致混凝土静力分析严重的收敛困难。研究人员不是在静态分析中解决问题, 而是采用隐式或显式集成方法实施动态分析程序。然而, 这种动态方法需要额外的努力来仔细选择, 例如时间积分算法、加载方案、加载时间、阻尼比和时间增量大小, 以在最小化惯性力之间取得良好的平衡 (为了更好地近似静态问题) 并减少计算时间 (通过使用更短的时间以加速方式对静态事件进行建模)。因此, 开发一种简单的求解策略以执行具有高收敛速度的静态分析过程仍然很重要。

误解: 误解是指用户对有限元软件包处理逻辑的误解。误解可能会导致输入数据的错误定义, 从而导致数值结果错误或中止分析。例如, 在混凝土结构的非线性有限元分析中, 混凝土本构定律的峰值后软化行为或受损混凝土的刚度退化的定义并不简单。此外, 此类分析需要分配大量输入数据并做出大量建模选择, 这在文献中很少以非常详细的方式报道。这是因为这些细节并不构成调查的重点, 而且通常是特定于软件的。然而, 如果没有报告获取关键输入数据的方法, 它可能会破坏有限元分析的可靠性和可重复性。

鉴于这些挑战, 本研究的目的是开发一种稳健可靠的建模策略, 以基于公认的本构关系来捕捉与低计算成本和易于实施相关的 RC 结构的拉伸开裂和压缩压碎行为来自 fib 模型代码。实施该策略以模拟 RC 梁的弯曲行为作为参考, 另一个相同的 RC 梁用外部粘合碳增强聚合物 (CFRP) 层压板加固; 两根梁都进行了四点弯曲测试, 直到失效。在参考梁上仔细研究了钢筋屈服阶段和混凝土极限破碎后的裂缝开口建模, 为加强梁的建模提供了可靠的依据。本文介绍的非线性有限元分析是使用商业软件 ABAQUS 中实现的混凝土损伤塑性 (CDP) 模型进行的, 因为它在学术界和工业界都广泛用于分析 RC

结构。本文的重点是为混凝土结构的非线性有限元分析提供可靠、实用且计算成本效益高的实施指南,可用作更复杂案例的基础,并支持非线性分析在实际工程中的应用问题,例如,用于承重评估、加固评估、结构健康监测以及建筑和土木工程结构的损坏识别。例如,使用外部粘合 FRP 层压板来加固和修复混凝土或砖石结构构件已成为一种有效的技术,并且在研究和实践中都引起了浓厚的兴趣,这支持了在这项工作中考虑这种情况。

一、实验测试

在本有限元研究中建模的钢筋混凝土构件包括在实验室中经受四点弯曲的两个细长钢筋混凝土梁。钢筋混凝土梁是在车间使用 C35/45 混凝土浇筑的。一根光束作为参考;另一种尺寸相同,在梁的受拉侧用外部粘合的 CFRP 层压板加固。梁的横截面尺寸,包括主钢筋、抗剪钢筋和外粘 CFRP 板(仅适用于加固梁)。使用双组分环氧树脂粘合剂(StoPox SK41, StoCretec GmbH, Kriittel, 德国)粘合 CFRP 板;其层设计厚度为 1 mm。对用于有限元分析的上述材料的力学性能进行了检查:混凝土 C35/45 在 287 天龄时的弹性模量 E_c 、抗压强度 f_c 和抗拉强度 f_{ct} ;混凝土 ν_c 的泊松比;钢筋的弹性模量 E_s 、屈服强度 f_{sy} 、极限强度 f_{su} 和极限应变 ϵ_{su} 根据 ASTM A615 对直径为 16 mm ($\Phi 16$) 的棒材进行实验室试验测量;CFRP 板的弹性模量 E_f 和极限拉伸应变 ϵ_{fu} 根据标准拉伸试验测量。

在四点弯曲试验中,梁被简单地支撑在两个可移动的钢支架上,有效跨度为 4.2 m。每端的钢支撑由两块相同的钢板(170x30x200 mm³)和一个钢圆柱滚子(直径为 50 毫米,长度为 200 毫米)组成。通过使用位移控制的两个同步液压千斤顶施加外部载荷。每个液压千斤顶的脚都放在一块钢板(50x50x200 mm³)上,以将负载分配到 RC 梁上。梁被加载到破坏。在参考梁中,钢筋屈服后的弯曲破坏由梁受压侧的混凝土压碎控制;加固梁的失效是由于中间弯曲裂缝引发的 CFRP 板过早剥离。

在测试过程中,应变仪和线性可变差动传感器(LVDT)用于监测梁试样。在受拉钢筋的跨中截面处安装了两个应变仪,并使用三个 LVDT 获得了跨中的净挠度。在测试过程中监测了 RC 梁的裂缝;在 15、30、45、55(仅参考梁)和 70 kN(仅加强梁)的载荷水平下,使用数字手持显微镜在受拉钢筋的高度测量裂缝宽度。

二、有限元建模策略

本研究特别关注断裂区的应变软化和钢筋与混凝土之间的粘结滑移的 RC 正确建模,以确保可靠地预测开裂和压碎。RC 结构非线性有限元建模中的常见关键问题以一般方式解决,这使得这些建议适用于其他类型的 RC 梁和框架结构。非线性有限元分析是使用商业有限元包

ABAQUS/CAE, 版本 6.14 进行的。

考虑到梁的几何形状和测试配置关于中跨是对称的,目前的有限元分析中只有一半的 RC 梁被建模以降低计算成本。作用在梁上的垂直载荷在有限元模型中定义为边界条件,在载荷和梁之间引起钢板顶部的垂直位移。钢板与梁的相互作用设定为面接触,定义了法线方向的界面约束和切线方向的摩擦。根据先前的建议,切向摩擦系数假定为 0.57。在梁和钢支撑之间的界面处使用相同的接触设置。在可移动钢支撑的底部,边界条件定义在中点,以限制垂直方向的自由度,但允许水平方向的平移。混凝土梁、加载点下方的钢板和可移动钢支撑采用二维壳建模,离散为结构化网格,并分配有单元类型 CPS4(具有四个积分点的 4 节点平面应力四边形单元)。钢筋和 CFRP 板,建模为一维(1D)线,分别分配有桁架(T2D2)和梁(B21)元素。

三、混凝土建模

混凝土材料在 ABAQUS 中实现的 CDP 模型中定义,包括定义混凝土塑性、拉伸行为、压缩行为和刚度的损伤演化。混凝土塑性:CDP 模型中要定义的混凝土塑性参数包括(1)Drucker-Prager 双曲线函数给出的与流动势相关的膨胀角 ϕ 和偏心系数 e ; (2)与屈服面相关的因子 σ_{b0}/σ_{c0} 和 K_c 基于 Lubliner 等人提出的函数以及 Lee 和 Fenves 提出的修改,以解释拉伸和压缩强度的演变; (3)粘度参数 μ 以引入粘塑性正则化。

四、FE 预测与实验结果比较

本研究参考了 RC 梁和 CFRP 加强梁的有限元模型(遵循上面介绍的建模策略),并采用了正在验证的 RC 参考建模选择,将参考梁的数值结果与实验测量结果进行比较,以检查预测的弯曲响应、裂缝模式、裂缝宽度和混凝土压碎导致的最终破坏的可靠性。参考梁的精确模拟为模拟由中间弯曲裂纹引发的 CFRP 剥离的临界破坏奠定了基础。选择 CFRP 加强梁的有限元分析以显示所提出的建模策略对具有额外复杂性的 RC 构件的适用性。

参考 RC 梁

弯曲响应表示为载荷-挠度行为。一般来说,有限元分析得到的载荷-挠度曲线与实验测量值相匹配;然而,在开裂点和由混凝土破碎控制的最终破坏方面存在微小差异。在实验测试的开裂阶段测得的较弱响应归因于测试前 RC 梁由于混凝土收缩和从车间到实验室的运输过程中的意外载荷而出现的轻微裂缝。在最终状态下,有限元分析预测弯曲破坏将在最大载荷 62.5 kN(跨中挠度为 68 mm)时开始,而实验测试中的加载过程在观察到混凝土破碎时停止(在 65.0 kN)挠度为 79 毫米。虽然有限元分析略微低估了弯曲破坏的极限能力,但弯曲响应的退化模拟得很好,没有收敛问题。

碳纤维增强钢筋混凝土梁

对屈服点后快速增长的裂纹开口进行可靠预测至关重要, 因为它是高级建模的基础, 重点关注由裂纹开口引发的后续问题。CFRP 加固梁的建模证明了这一点; 将加固梁的数值结果与弯曲响应、混凝土开裂和 CFRP 剥离的实验测量结果进行了比较

弯曲行为和 CFRP 剥离: CFRP 加强梁的弯曲响应用荷载-挠度曲线来描述。需要强调的是, 有限元分析预测了 CFRP 板在最大载荷 104 kN (挠度 44 mm) 下由中间裂纹 (IC 剥离) 引起的剥离, 这与 105 kN (挠度 45) 下 IC 剥离的实验观察结果非常吻合毫米)。研究了数值模拟中捕获的 IC 剥离的发展, 包括中间弯曲裂纹的萌生和通过去除完全损坏的粘合剂 (建模为粘性元素) 可视化的演变。

裂纹模式和裂纹宽度: IC 剥离的可靠预测高度依赖于基于适当建模选项的 RC 梁中裂纹的准确模拟。有限元分析中的裂纹模式和裂纹宽度通过不同载荷水平下的实验测量值进行了检查。

结论

在本文中, 提出了一种可靠的 RC 结构非线性有限元分析的稳健建模策略。参考有限元模型采用的建模选择通过参数研究和与其他常用选项的比较进行了验证; 研究了这些选择对数值结果的影响。本研究的贡献总结如下:

- 综合描述了分别考虑开裂和破碎混凝土断裂区的损伤演变和应变局部化, 推导和定义混凝土受拉和受压应力-应变关系的一致方法;

- 讨论了适当确定结构网格混凝土连续体中的裂缝带宽以调整拉伸应力-应变关系的原则和建议, 并证明在避免网格敏感性问题是有效的;

- 考虑到应变局部化效应, 提出了一种迭代实施程序, 根据已验证的破碎区尺寸修改峰值后状态下的混凝土压缩应力-应变关系;

- 提出了一种简单而稳健的方法, 用于在 ABAQUS 中使用节点到节点的连接器分配钢-混凝土钢筋相互作用, 并通过与基于粘性元素的常用方法进行比较来确认其准确性;

- 使用适当定义的粘度参数进行的粘塑性正则化能够克服混凝土开裂或破碎模拟中遇到的收敛困难, 从而显著减少计算时间; 所提出的建模策略, 如参考 RC 梁的有限元分析所示, 提供了对非线性响应的可靠模拟, 包括裂缝的发展和混凝土抗碎性的发展。在这个简单的案例中捕捉这些影响的能力为精确模拟由加强梁中的中间弯曲裂缝引起的 CFRP 剥离奠定了基础, 这为模拟具有额外复杂性的 RC 结构提供了一个示例。

本文针对非线性混凝土模型提出的大多数建议都是

通用的, 适用于使用不同有限元软件对其他准脆性材料模型进行有限元分析。所提出的建模策略可以直接用于对具有不同尺寸、加载配置和边界条件的 RC 梁和框架结构进行建模。目前的研究还为更复杂的有限元分析铺平了道路。

参考文献:

[1]Wells, G.N.; Sluys, L.J. A new method for modelling cohesive cracks using finite elements. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 2001, 50, 2667 - 2682.

[2]Bažant, Z.P.; Oh, B.H. Crack band theory for fracture of concrete. *Mater. Struct.* 1983, 16, 155 - 177.

[3]Rots, J.G.; Nauta, P.; Kuster, G.M.A.; Blaauwendraad, J. Smeared crack approach and fracture localization in concrete. *HERON* 1985, 30, 48.

[4]CEB-FIP. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code; Thomas Telford: Lausanne, Switzerland, 1993.

[5]Fib. Fib Model Code for Concrete Structures 2010; International Federation for Structural Concrete: Lausanne, Switzerland, 2013; ISBN 978-3-433-03061-5.

[6]American Concrete Institute. ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Metric); American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2014.

[7]Van Mier, J.G.M. Strain-Softening of Concrete under Multiaxial Loading Conditions. Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 20 November 1984.

[8]Bažant, Z.P. Identification of strain-softening constitutive relation from uniaxial tests by series coupling model for localization. *Cem. Concr. Res.* 1989, 19, 973 - 977.

[9]Jansen, D.C.; Shah, S.P. Effect of length on compressive strain softening of concrete. *J. Eng. Mech.* 1997, 123, 25 - 35.

[10]Zandi Hanjari, K.; Kettl, P.; Lundgren, K. Modelling the structural behaviour of frost-damaged reinforced concrete structures. *Struct. Infrastruct. Eng.* 2013, 9, 416 - 431.

[11]Thorenfeldt, E.; Tomaszewicz, A.; Jensen, J.J. Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design. In *Proceedings of the Symposium on Utilization of High-Strength Concrete*, Stavanger, Norway, 15 - 18 June 1987; pp. 149 - 159.

[12]Alfarah, B.; López-Almansa, F.; Oller, S. New methodology for calculating damage variables evolution in plastic damage model for RC structures. *Eng. Struct.* 2017, 132, 70 - 86.