

钢筋混凝土结构弹塑性分析在 ANSYS 中的实现

周岑 孙利民

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室 200092)

摘 要 钢筋混凝土结构是现代土木工程中最常用的结构形式。本文针对运用 ANSYS 进行钢筋混凝土结构的弹塑性分析, 通过与理论解比较, 依据分析对象的结构层次(结构、构件)、分析类型(静力单调加载、反复加载)、荷载水平(线弹性、弹塑性), 讨论了单元类型、材料模型及模型参数的选取, 必要时甚至采用 UPF 等二次开发工具进行分析。分析表明, 合理的模型可以得到令人满意的结果。

关键词 钢筋混凝土结构 弹塑性 ANSYS

Realization of RC Structure Elasto-plastic Analysis with ANSYS

Zhou Cen Sun Limin

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering)

Abstract: RC structure is the most common structure type in modern civil engineering. In this paper, how to analyze RC structure elasto-plastic analysis with ANSYS is discussed. Compared with theoretical results, it is discussed how to select element type, material model and parameter based on the structure level (whole structure or member), analysis type (under static monotone load or cyclic load), load level (linear elastic or elasto-plastic) and UPF if necessary. The analysis shows that satisfactory results may be obtained from rational models.

1 前言

钢筋混凝土材料由于结实且价格低廉, 已经成为土木工程结构中采用得最多的材料。土木工程师在对钢筋混凝土结构进行受力分析时, 往往希望通过采用诸如 ANSYS 等通用有限元软件计算。由于钢筋混凝土实际上是一种复合材料, 且混凝土本身的均质性较差。在运用 ANSYS 进行分析时应合理选用单元类型及材料模型, 以求较好的计算精度。

2 单元类型的选取

钢筋混凝土结构有限元分析中单元划分通常基于两个层次: 梁杆单元和实体单元。前者着重分析单元力(包括力和弯矩) 与位移(包括位移和转角) 之间的关系, 而后者着重于分析单元的应力 - 应变关系。单元类型的选取应兼顾计算规模、材料模型的精度等多方面的因素。通常对于大型结构进行分析时, 分析模型应包括上部结构、下部结构、基础, 甚至一定范围内的地基, 这样才能较好的考虑整体结构的受力状况。但由于全结构模型规模较大, 通常采用梁杆单元将结构离散成为梁杆体系进行分析。钢筋混凝土结构计算中采用梁杆体系的

另一个重要原因是由于钢筋混凝土材料本构模型的复杂性（将在下节详细介绍），将钢筋混凝土材料应力 - 应变关系运用于计算所得到的精度通常低于直接将实验取得的构件 M - （弯矩 - 转角）关系运用于计算。值得推荐的做法是先采用梁杆单元模型计算出整个结构的受力情况，再对受力复杂区域（如梁柱节点）或重要的构件等子结构将梁杆体系中计算得到的力和位移施加到实体单元模型上，分析局部应力和应变。随着计算机软硬件技术的发展，计算规模的限制将不断被突破。在结构分析中应该尽可能多地采用三维实体单元建模，力求最大程度的真实模拟实际结构各构件的几何尺寸、空间位置、连接条件和边界条件。

3 材料模型的选取

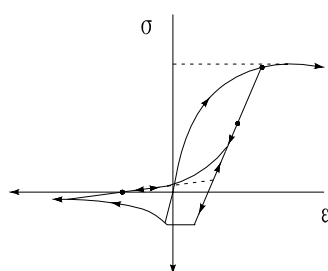


图 1 典型的混凝土本构曲线

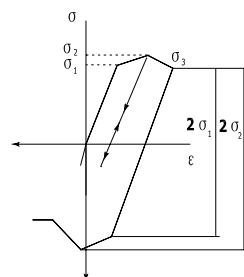


图 2 多线性随动强化模型(MKIN)

钢筋混凝土结构有限元分析的最大的难点在于材料模型的准确描述。钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种具有不同物理 - 力学性能的材料组合而成的复合材料，分析其材料模型首先应把握两者的力学性质。钢筋作为一种金属材料，其力学模型相对容易把握，一般采用双线性随动强化模型（BKIN）。而混凝土作为一种混合材料，其本构模型非常复杂，将在下文重点论述。其次，钢筋与混凝土两者之间的粘结、滑移以及相互作用是非常复杂的。因此，虽然历经近百年的试验研究，对钢筋混凝土机理的认识水平日益深刻，但是在本构关系上尤其是运用到有限元计算中还不能说已经较好的解决了问题。

混凝土是由粗细骨料与水泥加水拌和而成的混合材料（有时还有少量的外加剂），硬化后的混凝土中包含少量的自由水、孔隙，因此严格的说混凝土不是一种均质材料。而 ANSYS 等通用有限元软件中提供的材料模型大多数为基于经典材料力学理论的均质材料模型，如金属等。通过典型的混凝土本构曲线（图 1）可以看出混凝土的本构关系区别于金属材料的特点主要有：1.混凝土是一种脆性材料，破坏形式包括受压压碎或受拉开裂；2.混凝土材料在空间上可以看作各向同性，即 x 轴、y 轴、z 轴受力性能相同，但是单轴受力情况下受拉区和受压区差异较大，受拉区基本上为线弹性，受拉强度仅为受压强度的 1/10 左右；3.受压区屈服后混凝土“软化”，本构曲线有下降段；4.滞回模型路径比较复杂。ANSYS 中有多种材料模型可供选择，其中包括许多考虑非线性的模型，其中多线性随动强化模型(MKIN)合理的选取参数后可以比较接近混凝土模型（图 2）。该模型可以描述下降段，反映混凝土的软化。也可以通过合理采用 σ_1 ， σ_2 和 σ_3 的值调整本构模型曲线，模拟材料的“包兴格效应”（Bauschinger effect）。但是，该模型还不足以反映混凝土材料特性的。由于混凝土材料 ϵ_t 远远小于 ϵ_c ，所以无法通过调整 σ_1 ， σ_2 和 σ_3 组合出混凝土的曲线。再则，由于该模型是基于金属材料，具有较好的延性，滞回曲线的耗能能力较强。而典型的混凝土材料卸载时刚度下降非常快，几乎指向原点，耗能能力很差，因此该模型无法反映混凝土材料滞回曲线的“捏拢效应”（pinch effect）。最关键的是该模型无法反映混凝土压溃和开裂后退出工作的特

性,而混凝土不开裂则钢筋不能发挥作用从而未能发挥钢筋混凝土的优势。因此,该模型可以在一定范围内描述混凝土的特性,如线弹性阶段或混凝土单调加载进入非线性阶段。但是,该模型是不足以完整的描述混凝土特性的。

ANSYS 中有专门用于钢筋混凝土结构的 Solid65 单元及 Concrete 材料,可以考虑反映混凝土压溃和开裂。Solid65 单元为八节点六面体单元,可通过定义三个方向的配筋率考虑三个方向的钢筋。钢筋可受拉或受压,但不可受剪。混凝土材料可通过选取非线性模型考虑塑性变形和徐变。Concrete 材料模型的基本参数有开裂截面和裂缝闭合截面的剪切传递参数,单轴和多轴抗拉、抗压强度等。利用 Solid65 单元及 Concrete 材料可以在一定范围内较好的进行钢筋混凝土结构非线性分析,但是对于复杂加载路径下结构的响应,如地震动作用下结构的滞回性能的分析,由于本构模型过于粗糙,有可能得不到令人满意的结果。

长期以来,钢筋混凝土结构的分析主要靠实验和经验公式,任何一种材料模型的建立都基于大量实验结果。为建立合适的钢筋混凝土材料模型而进行的实验通常也分为几个层次:1.分别对钢筋、混凝土、粘结、裂缝进行实验,将它们的模型组合成为钢筋混凝土模型;2.单向加载的钢筋混凝土单元;3.双向加载的钢筋混凝土单元;4.钢筋混凝土构件。显然实验的层次越高则模型越接近实际问题,如构件实验的 $M - \theta$ (弯矩 - 转角) 关系运用到实际结构中通常可以得到较好的结果。但是层次越低则模型应用的范围更广泛,当然相应的精度有所降低。混凝土作为一种非均质材料,影响其力学特性的因素很多,在实验中表现的力学性能具有很大的变异性。为了考虑这些非线性因素,往往需要引入许多参数,这些参数又相互影响。而一个精确有效的材料模型包含的参数不应过多,这也是定义混凝土材料模型的难点所在。因此,包括 ANSYS 在内的任何一种通用有限元软件都不可能、也没必要试图定义一个复杂的、含有很多参数的弹塑性材料来模拟力学性能离散性极强的钢筋混凝土材料。

ANSYS 具有良好的开放性,用户可以借助 ANSYS 提供的二次开发功能扩充其用途。其中 UPF(User Programmable Features)功能提供了用户自定义材料,允许用户实现标准 ANSYS 所不具备的材料本构模型,用户只需修改 ANSYS 的接口文件 USERMAT.F 或 USERPL.F 即可。对于钢筋混凝土这种较为复杂的材料模型,用户只要自己确定合理的算法,就可以将其移植到 ANSYS 中,利用标准 ANSYS 出色的单元库及非线性方程求解器进行钢筋混凝土结构的非线性分析。

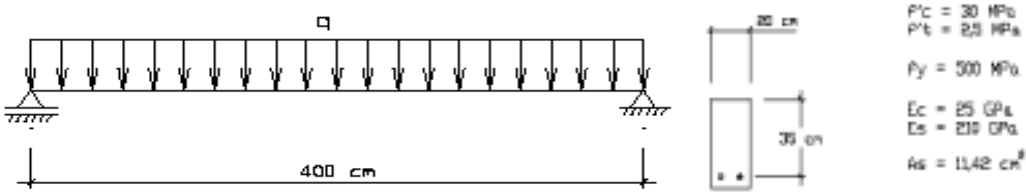


图 3 均布荷载钢筋混凝土简支梁模型

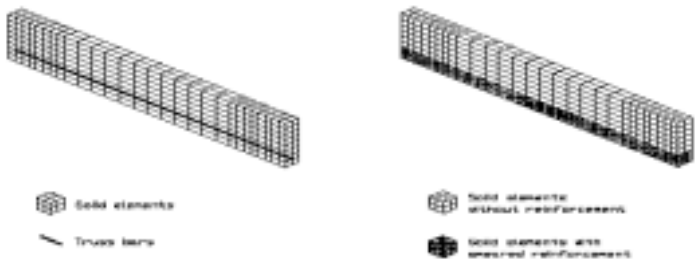


图 4 混凝土 Solid65 单元中的离散钢筋单元与弥散钢筋单元

4 算例

本文以一根受单调均布荷载的简支梁（图 3）为例比较了单元和材料模型选取对分析结果的影响。钢筋单元分为离散单元（discrete element）和弥散单元(smeared element)两种（图 4），离散钢筋单元采用 Link8，弥散钢筋单元则是在 Solid65 单元中实现。为了体现混凝土的开裂特性，混凝土单元采用 Solid65 单元。钢筋材料模型采用了线弹性模型（Linear elastic）和双线性弹塑性材料（BKIN）模型。混凝土模型均考虑受拉开裂（Cracking），受压开裂或不开裂带下降段的多折线随动强化模型。各种分析模型组合见表 1。

表 1 分析模型编号汇总

Discrete	concrete		MKIN+Crushing	MKIN
	steel			
	Linear elastic		DisLC	DisLM
Smeared	concrete		MKIN+Crushing	MKIN
	steel			
	Linear elastic		SmrLC	SmrLM
	concrete		MKIN+Crushing	MKIN
	steel			
	BKIN		SmrBC	SmrBM

计算所得的荷载 - 跨中挠度曲线如图 5 所示，为更清楚的比较开始阶段计算结果与理论解，右图将之予以放大。计算结果表明，钢筋混凝土结构的计算比较容易发散，完成结构从开裂到破坏的全过程分析是比较困难的。由于在计算结果范围中钢筋还未屈服，所以钢筋材料模型的选取中是否考虑了塑性段对结果影响不大，线弹性模型的计算结果未另外给出。计算所得的梁的刚度和第一次屈服点与理论解十分接近。第一次屈服点即钢筋混凝土梁下缘混凝土开裂，刚度突然严重降低。荷载转由钢筋单独承担，梁的刚度较开裂前有所降低。从右图不难看出，离散单元模型（DisBC&DisBM）的曲线较弥散单元模型（SmrBC&SmrBM）的曲线在开裂点突变更加明显，主要是由于素混凝土单元开裂退出工作导致的。

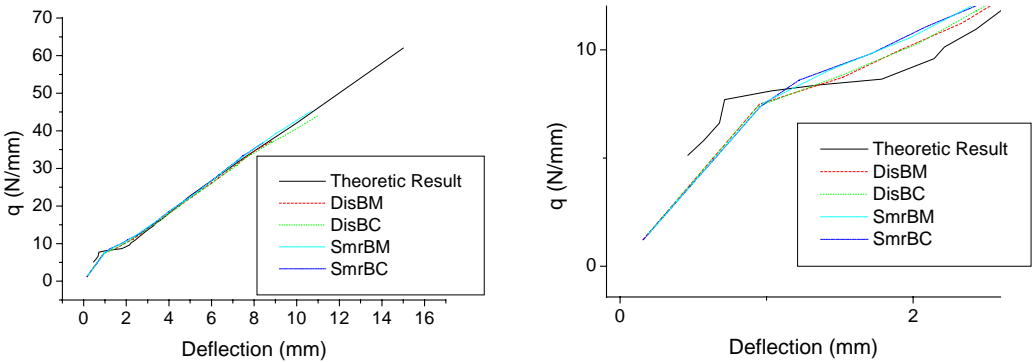


图 5 计算结果与理论解相比较

5 结论

对钢筋混凝土结构进行从开裂到构件断裂直至完全破坏的全过程有限元分析是非常困

难的。但是，如果针对分析对象的结构层次、分析类型、荷载水平，合理的选取单元类型、材料模型，是可以取得令人满意的分析结果的。

参考文献：

- [1] Antonio F. Barbosa and Gabriel O. Ribeiro, “ Analysis of Reinforced Concrete Structures Using ANSYS Nonlinear Concrete Model ” , *Computational Mechanics*
- [2] Zhou,C., Sun,L.M., et al.(2002) “ Simulation of RC Structure Collapse Due to Earthquake Loading ” , *Proceedings of 2002 ANSYS User 's Conference*, Pittsburgh, USA , No 101