

# Ansys 模拟钢筋混凝土结构的探讨

吴 飏

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘 要** 本文分析了三种钢筋混凝土有限元模型: 组合式模型、整体式模型和分离式模型。针对应用最为广泛的分离式模型, 结合了一个双向板混凝土结构试验的模拟和分析, 指出了用 Ansys 有限元程序作为辅助的研究手段来模拟试验过程的可行性和重要性。

**关键词** Ansys; 组合式模型; 整体式模型; 分离式模型

**Abstract:** This thesis introduces three kinds of reinforced concrete finite element method model which are assembled model, smeared model and discrete model. It is discrete model which is applied most widely to simulate and analyse a test of a two-way reinforced concrete floor slab. It is feasible and important to use Ansys programme as a accessorial research instrument to simulate test process.

**Key words:** Ansys; assembled model; smeared model; discrete model

结构实验在“混凝土结构理论”的诞生和发展过程中起着非常重要和不可替代的作用。目前, 世界各国的混凝土结构设计规范都是以大量的实验数据为基础而建立起来的。体形特殊、结构复杂的混凝土结构物往往还要通过整体结构的模型实验来验证设计理论、改进设计方法。随着计算机技术的日益普及, 计算机工具在提高社会生产力方面发挥了越来越重要的作用, 在世界范围内有限元已经成为土木建筑行业分析软件的主流。有限元法在钢筋混凝土结构的分析中已经得到了广泛的应用。它能够给出结构或构件的内力和变形发展的全过程、描述裂缝的形成和发展以及结构或构件的破坏过程及形态; 能够对构件的极限承载能力做出评估。所以有限元法在钢筋混凝土设计和计算中有着不可比拟的优点<sup>[1]</sup>。

## 1 三种钢筋混凝土有限元模型

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组成的, 在进行有限元分析时如何合理离散化结构对计算结果起到至关重要的作用。钢筋混凝土有限元模型按钢筋模拟方法的不同, 可分为组合式、整体式和分离式三种模型<sup>[2-4]</sup>。

### 1.1 组合式模型

组合式模型通常假定钢筋与混凝土处于同一位移, 即认为钢筋与混凝土完全粘结, 不考虑其粘结滑移。它将混凝土和钢筋包含在一个单元之内, 分别计算它们对单元刚度矩阵

的贡献, 再通过叠加得到单元的刚度矩阵。根据钢筋单元刚度矩阵的计算方法可分为分层组合式和埋置组合式二种。分层组合式模型是将混凝土与钢筋沿截面高度或厚度分成若干层, 每一层按照平面应力状态(忽略垂直于层面应力的影响)和对截面的应变作出的假定(如应变沿截面高度为直线分布的平截面假定), 根据材料的应力-应变关系和平衡条件计算其刚度矩阵。其中有代表性的是分层梁单元和分层板单元。

### 1.2 整体式模型

整体式模型仍忽略钢筋与混凝土之间的粘结滑移, 将钢筋弥散于混凝土单元之中, 相当于把钢筋混凝土看作一种新的匀质等效材料, 通过调整单元的材料力学性能参数考虑钢筋对整个结构的贡献。通常先求出混凝土的本构矩阵和钢筋的本构矩阵, 再将二者叠加作为单元的本构矩阵, 其实质是先求得综合了混凝土和钢筋贡献的应力应变关系矩阵, 然后一次求得综合的单元刚度矩阵。这一模型计算简单, 适用于钢筋较多、布置均匀且不计钢筋与混凝土之间的相对滑移的情况。但和分离式和组合式相比, 其主要缺点是误差较大, 不能考虑钢筋在单元中的具体位置和方向, 不能求出钢筋应力分布, 也无法计算裂缝的宽度。

### 1.3 分离式模型

分离式模型将钢筋和混凝土作为不同单元处理。混凝土采用块体单元模拟,钢筋因相对细长,通常可忽略其横向抗剪强度而用杆单元模拟,在横向剪切作用不能忽略的情况下仍采用块体单元模拟,两者之间的粘结和滑移用联结单元来模拟。分离式模型的优点是能考虑钢筋与混凝土之间的粘结滑移,可较正确地计算裂缝宽度;主要缺点是钢筋单元必须在混凝土单元边线上,单元的划分必须适应钢筋的轮廓线,从而受到钢筋分布和方向的限制。这种模型的应用最为广泛。下面将结合一个双向板混凝土结构试验的模拟来分析该模型。

## 2 双向板混凝土结构试验的模拟和分析

### 2.1 试验概况

文献 [5]中的双向板混凝土结构为9跨,如图1所示,在9块双向板上施加均匀的面荷载直至结构破坏,试验的极限荷载为26.2kN/m<sup>2</sup>

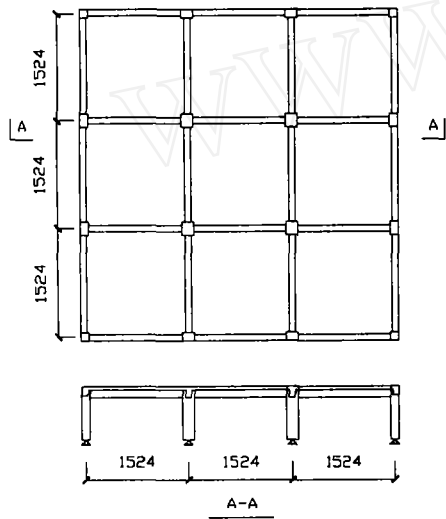


图1 结构的平面图和剖面图(单位: mm)

### 2.2 建立模型

由于对称性,只需建立1/4模型即可,在对称面上可以采用对称约束。混凝土模拟采用程序专门提供的Solid65单元,钢筋采用Link8轴力杆单元。由于采用的是分离式模型,所以Solid65无需定义实常数。Link8则要通过不同钢筋截面积的输入来完成实常数定义。本模型是先创建所有节点,然后采用APDL命令创建钢筋和混凝土单元。具体模型如图2,图3所示:

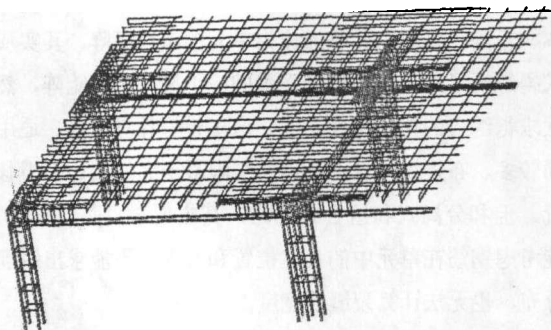


图2 1/4模型中的全部钢筋

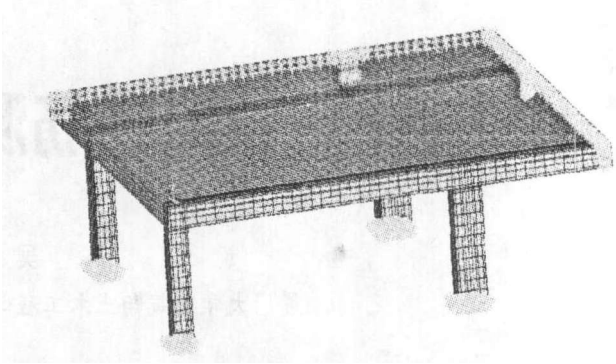


图3 带边界条件的1/4模型

本程序混凝土采用miso+concr来定义<sup>[10]</sup>。Miso表示多折线等向强化混凝土本构关系。混凝土的单轴应力-应变关系采用Kent-Park模型<sup>[7]</sup>(图4)。

$$\begin{aligned} 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_0 & \quad \sigma = \sigma_0 [2(\varepsilon/\varepsilon_0) - (\varepsilon/\varepsilon_0)^2] \\ \varepsilon_0 < \varepsilon \leq 3\varepsilon_0 & \quad \sigma = (1.4 - 0.4\varepsilon/\varepsilon_0)\sigma_0 \\ 3\varepsilon_0 < \varepsilon & \quad \sigma = 0.2\sigma_0 \end{aligned}$$

式中:  $\varepsilon_0, \sigma_0$ — $\sigma-\varepsilon$ 曲线峰值处应变、应力。

将超过峰值应变后的混凝土受压应力-应变曲线按下降段输入对计算所得的棱柱体应力-应变关系基本无影响,泊松比的取值对分析结果也无明显影响。

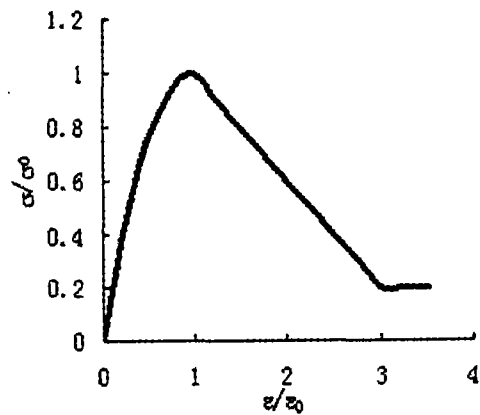


图4 混凝土应力应变曲线

Concr选项通过混凝土材料数据表中9个参数来完成混凝土的材料定义<sup>[11]</sup>。9个参数依次为张开裂缝剪力传递系数、闭合裂缝剪力传递系数、单轴抗拉强度、单轴抗压强度、双轴抗压强度、静水压力、静水压力下双轴抗压强度、静水压力下单轴抗拉强度、混凝土开裂后刚度折减因子(也称拉应力衰减因子)。因为Ansys采用Willam&Warnke五参数破坏准则,所以在低静水压力和高静水压力状态下,混凝土的性能是不同的,因而在低静水压力状态下,只需要输入上述的单轴抗拉和单轴抗压强度就可以了,其他通过程序默认。

计算分析表明,混凝土单轴抗压强度系数与张开裂缝剪力传递系数的取值是能影响模型全过程分析成败的主要因素。

打开混凝土的压碎功能将导致混凝土过早压碎,只有关闭压碎功能时棱柱体的承载力才与实际结果相近。混凝土单

轴抗压强度系数取-1,其意义为在计算过程中不考虑混凝土的受挤压破坏,此时相当于是带有拉力截断的 Von Misses 模型,尽管与标准的混凝土本构模型有一定差异,但在静水压力不是很大的情况下仍然可以取得较好的结果。

### 2.3 施加荷载和求解控制

在钢筋混凝土结构、构件非线性有限元分析中,一般来说控制加载方法可分为荷载控制和位移控制方法。通常的荷载控制方法用来模拟结构、构件的上升段也就是结构、构件屈服之前的非线性分析是没有问题,并且结构、构件屈服之后的平台段也可以通过不断调整荷载步长来模拟。对比分析表明,两种加载方式对最终计算结果影响不大。但是不论何种加载方式都应避免单点加载,从而减小应力集中的程度。本程序采用的是荷载控制方法。

加载完毕后进行求解。对结构进行非线性有限元分析,实际上就是求解一组非线性代数方程。对于材料非线性问题,Ansys 程序中求解方法和求解器的选择十分重要。

在钢筋混凝土结构、构件的非线性分析中,非线性方程的求解方法可归纳三类:迭代法、增量法和增量迭代混合法。目前,增量迭代混合法是钢筋混凝土结构、构件非线性有限元分析最为常用的,它综合了增量法和迭代法两者的优点。以往大多数情况下,采用的是基于切线刚度的增量迭代法来进行非线性分析,并能取得较好的效果。然而基于切线刚度的增量迭代法在模拟结构、构件的上升段即屈服之前的非线性分析是没有问题的。但是模拟结构、构件的屈服平台段或者屈服之后的非线性分析以及结构、构件滞回性能的模拟必须特别地进行处理,从而避免结构、构件在模拟过程中出现负刚度[K],因此导致计算难以收敛<sup>[12]</sup>。

因为希望得到较为准确的荷载-变形过程,所以要对每一级增量过程进行多次校正,以消除不平衡力,使计算结果满足给定的精度要求。Ansys 程序提供了牛顿拉普拉斯求解方法,使每一个荷载增量结束时,在某个容限范围内求解能够达到平衡收敛,如果不收敛,则重新估算非平衡荷载,修改刚度矩阵,获得新解,持续这种迭代过程直到问题收敛。

Ansys 中提供的求解器有波前法、稀疏矩阵直接解法、雅可比共轭梯度法、不完全的乔类斯基共轭剃度法<sup>[11]</sup>等。经笔者试算研究发现,由于稀疏矩阵直接解法求解器以直接消元为基础,病态矩阵不会造成求解困难,所以牛顿拉普拉斯求解方法与此求解器配合使用特别适合混凝土材料非线性问题的分析。

在采用基于割线刚度的 Newton-Raphson 法求解上述非线性方程组时,必须为终止增量迭代而采用现实可行的收敛准则。即在每一次迭代完毕,都应检查所得解是否收敛于预定的限值或迭代是否发散。如果收敛限值太宽,将会得到不够准确的结果,而如果限值太小,则许多计算工作将用在那些并不需要的精度上。常用的非线性方程组迭代收敛准则有

三种,分别是基于位移、不平衡力和能量控制的准则。一般由于基于能量收敛准则综合了基于位移、不平衡力收敛准则各自的一些特性,并且还能判断基于位移和基于不平衡力收敛准则所不能有效控制迭代的情况。经笔者大量试算,进行钢筋混凝土结构非线性分析采用位移的二范数收敛准则判定效果较好。且误差允许范围放松至 5%~10%时,可以取得较满意的结果。

混凝土材料非线性计算收敛较困难。当不收敛是由于数值计算导致的,可以采用下述方法来加强问题的收敛性<sup>[13]</sup>。

(1)使用小的时间步长。一般较小的时间步通常导致较好的精度,但对于混凝土的材料非线性分析,子步设置太大或者太小都不能达到正常收敛。需要根据实际情况慢慢调整试算,确定合适的时间步长。

(2)如果自适应下降因子是关闭的,打开它,相反,如果它是打开的,且割线刚度正在被连续地使用,那么关闭它。笔者大量试算发现关闭自适应下降因子一般能达到较好的效果。

(3)使用线性搜索,特别是当大变形或大应变被激活时。

### 2.4 计算结果及分析

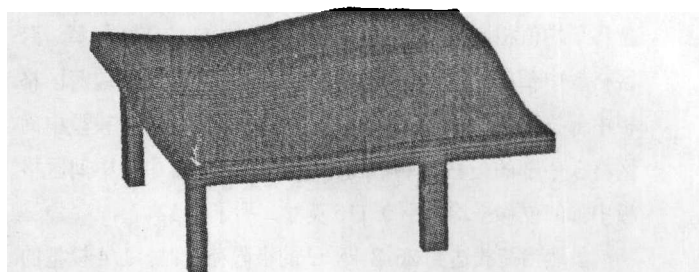


图5 1/4模型在 26.2kN/m<sup>2</sup>面荷载下的变形图

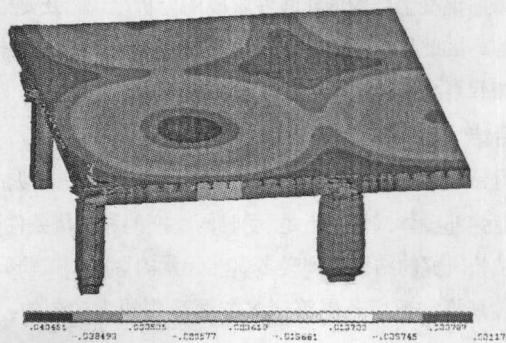


图6 1/4模型在 7.33kN/m<sup>2</sup>面荷载下的 Z 方向位移等值线图

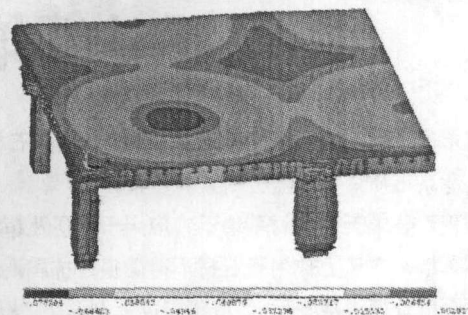


图7 1/4模型在 10.4kN/m<sup>2</sup>面荷载下的 Z 方向位移等值线图

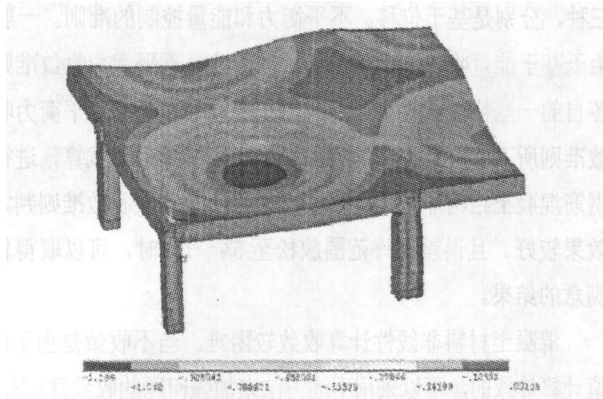


图8 1/4模型在26.2kN/m<sup>2</sup>面荷载下的Z方向位移等值线图

对比文献 [5] 中 FIG. 8, FIG. 11 和 FIG. 12 可知, 当在 7.33 kN/m<sup>2</sup> 面荷载作用下时, 1/4 模型角区格板中部的位移为 0.043 英寸与 FIG. 8 中的角区格板中部位移平均值相符; 1/4 模型边跨区格板中部的位移为 0.038 英寸, 比 FIG. 8 中的边跨区格板中部位移平均值小 0.002 英寸; 1/4 模型中间区格板中部的位移为 0.028 英寸, 比 FIG. 8 中的中间区格板中部的位移平均值大 0.001 英寸。同样, 在 10.4 kN/m<sup>2</sup> 面荷载作用下时, 1/4 模型各区格板中部位移值与 FIG. 11 相比基本相符合。在 26.2 kN/m<sup>2</sup> 面荷载作用下, 1/4 模型角区格板中部的位移为 1.199 英寸与 FIG. 12 中的角区格板中部位移平均值相比小了 0.13 英寸, 小了约 11%; 1/4 模型边跨区格板中部的位移为 1.062 英寸, 比 FIG. 12 中的边跨区格板中部位移平均值小 0.16 英寸, 小了约 15%; 1/4 模型中间区格板中部的位移为 0.925 英寸, 比 FIG. 12 中的中间区格板中部的位移平均值小 0.115 英寸, 小了约 12%。

虽然当荷载达到 26.2 kN/m<sup>2</sup> 的极限荷载时, 1/4 模型的挠度比试验中的数据相差 10%~15%, 但是 10%~15% 的误差对于钢筋混凝土结构的非线性阶段的分析来说, 还是能令人满意的。因此该 1/4 模型比较成功的模拟出文献 [5] 中结构试验加载直至破坏的受力全过程。

### 3 结语

用 Ansys 有限元程序作为辅助的研究手段来模拟试验过程, 能弥补实体试验的不足(受时间、空间和经济条件限制, 以及试验研究的结果受到较多偶然因素的影响; 试验研究在数量、规模和适用范围等诸多方面受到较大的制约; 配筋

率、配筋方式、构件截面高宽和宽度变化等对构件极限承载力的影响, 需按照参数做很多分组试件, 数量多、投入大、时间长), 而且用 Ansys 有限元程序模拟由于相对成本较低, 不受时间、空间的制约, 可以考虑更多的影响结构受力性能的因素。为了研究各试验参数, 分析中调整参数即可分析参数变化带来的影响, 对混凝土结构理论的发展和應用都将产生积极的作用。

### 参考文献

- [1] 顾祥林, 孙飞飞. 混凝土结构的计算机仿真[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [2] 郝文化, 叶裕明, 刘青山. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [3] 尚晓江, 邱峰, 赵海峰. ANSYS 结构有限元高级分析方法与范例应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [4] 郝文化, 肖新标. ANSYS 实例分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [5] W. L. Gamble, M. A. Sozen, and C. P. Siess, "Test of a Two-Way Reinforced Concrete Floor Slab," [J]proc. ASCE, vol. 95, no. ST6, 1969, pp. 1073-1096
- [6] 李悦军. 钢筋混凝土框架边梁协调扭转性能的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [7] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] 江见鲸, 卢新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] ANSYS Inc, ANSYS Elements Reference[M]. Twelfth Edition. March 2001.
- [10] ANSYS Inc, ANSYS Theory Manual[M]. Twelfth Edition. March 2001.
- [11] 博嘉科技编著. 有限元分析软件 - Ansys 融会与贯通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [12] 来武清. 基于修正斜压场德钢筋混凝土二维非线性有限元分析[D]. 重庆大学, 2005.
- [13] ANSYS 公司. ANSYS 高级技术分析指南[M]. 1998. 囧

## 天然石材幕墙不得用于高层建筑

北京首部石材标准、我国第一部建筑工程装饰石材应用的工程建设标准《建筑装饰工程石材应用技术规程》, 目前由北京市建委、北京市质量技术监督局共同发布。

“规程”要求天然石材幕墙不宜应用于高层及超高层建筑中, 如果设计要求采用时, 要有石材防碎裂措施。“非抗震设计的石材幕墙, 在风力作用下石材不得破损; 抗震设计的石材幕墙, 在设防烈地震作用下经修理后幕墙仍可使用; 在罕遇地震作用下幕墙骨架不得脱落。”市建委负责人说, “石材幕墙构件设计时, 应充分考虑到幕墙系统在重力荷载、风荷载、地震作用、温度作用和主体结构位移影响下具有的安全性。”