

## 利用 ANSYS Solid 65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构

陆新征, 江见鲸

清华大学土木工程系, 北京, 100084

**摘要:** 在大型有限元软件 ANSYS 中, 为混凝土材料专门定义了一种单元: Solid 65。它不但可以模拟混凝土材料特有的开裂, 压碎等力学现象, 而且预先定义好了混凝土的破坏准则, 为使用者提供了很多方便。在本文中, 作者结合自己的科研工作, 通过 4 个科研项目实例, 介绍了 Solid 65 单元在框架、叠合梁、约束混凝土柱、组合结构节点等问题中的应用。详细讨论了 Solid 65 单元和钢筋、型钢、钢管、碳纤维等不同材料共同工作时建模的方法及相互连接的处理。这些计算实例表明, 在准确建立有限元模型并合理选择各种材料组合方法的前提下, 利用 ANSYS 可以对各种混凝土结构进行准确的模拟, 从而可以减小试验工作量, 节省开支。但是, 如果有限元模型建立不当, 也会造成错误的结果, 本文中对这些错误进行归类分析, 提出了解决方法。

**关键词:** 有限元, 混凝土, ANSYS;

### Analysis for Concrete Structure under Complex Stress Condition with Solid 65 FEA Element of ANSYS

LU Xinzheng, JIANG Jianjing

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

**Abstract:** In the FEA software of ANSYS, an element type of "Solid 65" is defined for concrete material, specially. It not only can simulate the typical mechanics behavior of concrete such as crack and crush, but also includes the failure criteria of concrete. This applies a lot of convenience to the user. In this paper, according to the research work of the author, the applications of Solid 65 in frame structure, composite beam, confined column and joint of composite structure are presented together with 4 practical examples. And the methods to setup the connection between concrete and other materials are discussed in details, when the concrete is working together with other materials such as rebar, section steel, steel tube and carbon fiber. These examples show that with proper FEA model and connection method, ANSYS can simulate concrete structure precisely. Hence, it can reduce the test work and save the cost. However, if the FEA model is not correct, there will be mistakes in the results. These mistakes are classified in this paper and advises are given to avoid them.

**Keywords:** FEA, concrete, ANSYS;

### 一、引言

混凝土是目前应用最为广泛的建筑材料之一。它可以很方便地与钢筋、型钢、钢管以及其他一些结构材料组合成多种多样的构件和节点, 应用于各种结构形式中。为了了解混凝土结构的详细受力机理和破坏过程, 往往需要利用三维实体单元进行非线性有限元分析。而混凝土本身同时具有开裂、压碎、塑性等诸多复杂力学行为, 在三维条件下这些力学行为更加难以确定, 给实际应用带来了较大的困难。为了便于使用者应用, ANSYS 软件内部设定了专门面对混凝土材料的三维实体单元形式 SOLID 65。并建立了三维情况下混凝土的破坏准

则, 提供了很多缺省参数, 从而为使用者提供了很大的方便。此外, ANSYS 软件本身所拥有的大量单元形式, 可以很方便的让使用者建立混凝土和其他材料之间的共同工作模型, 因此在很多实际问题中都取得了成功应用。本文将结合作者实际参加的一些研究项目来说明其具体应用。

## 二、 SOLID 65 单元的使用方法

SOLID 65 单元本身包含两部分。一是和一般的 8 节点空间实体单元 SOLID 45 相同的实体单元模型, 但是加入了混凝土的三维强度准则。二是由弥散钢筋单元组成的整体式钢筋模型, 它可以在三维空间的不同方向分别设定钢筋的位置, 角度, 配筋率等参数。在实际应用中, 一般需要为 SOLID 65 单元提供以下数据:

- 1) 实参数 real constants; 在实参数中给定 SOLID 65 单元在三维空间各个方向的钢筋材料编号, 位置, 角度和配筋率。对于墙、板等钢筋分布比较密集而又均匀的构件形式, 一般使用这种整体式钢筋混凝土模型。
- 2) 材料模型 Material Model; 在这里设定混凝土和钢筋材料的弹性模量, 泊松比, 密度。
- 3) 数据表 Data Table; 在这里给定钢筋和混凝土的本构关系; 对于钢筋材料, 一般需要给定一个应力应变关系的 Data Table, 譬如双折线等强化或随动硬化模型等。而对于混凝土模型, 则需要两个 Data Table。一个是本构关系的 Data Table, 比如使用 Multilinear kinematic hardening plasticity 模型或者 Drucker-Prager plasticity 模型等, 用来定义混凝土的应力应变关系。另一个则是 SOLID 65 特有的 Concrete element data, 用于定义混凝土的强度准则, 譬如单向和多向抗压强度等等。

本文附录中给出了定义混凝土材料的 log 文件流。

## 三、 混凝土与其他材料的组合

### 一) 与钢筋的组合

混凝土与钢筋组合是最常见的一种组合方式, 一般说来, 可供选择的方法有以下三种:

- 1) 整体式模型  
直接利用 SOLID 65 提供的实参数建模, 其优点是建模方便, 分析效率高, 但是缺点是不适用于钢筋分布较不均匀的区域, 且得到钢筋内力比较困难。主要用于有大量钢筋且钢筋分别较均匀的构件中, 譬如剪力墙或楼板结构。
- 2) 分离式模型, 位移协调  
利用空间杆单元 link 8 建立钢筋模型, 和混凝土单元共用节点。其优点是建模比较方便, 可以任意布置钢筋并可直观获得钢筋的内力。缺点是建模比整体式模型要复杂, 需要考虑共用节点的位置, 且容易出现应力集中拉坏混凝土的问题。
- 3) 分离式模型, 界面单元  
前两种混凝土和钢筋组合方法假设钢筋和混凝土之间位移完全协调, 没有考虑钢筋和混凝土之间的滑移, 而通过加入界面单元的方法, 可以进一步提高分析的精度。同样利用空间杆单元 link 8 建立钢筋模型。不同的是混凝土单元和钢筋单元之间利用弹簧模型来建立连接。不过, 由于一般钢筋混凝土结构中钢筋和混凝土之间都有比较良好的锚固, 钢筋和混凝土之间滑移带来的问题不是很严重, 一般不必考虑。

### 二) 与型钢及其他材料的组合

一般当混凝土和型钢相组合时, 由于型钢截面尺寸大, 界面上剪力很大, 且型钢界面一般较光滑, 因此, 型钢和混凝土之间位移不协调情况比较显著, 需要考虑。在 ANSYS, 有

以下建模方法

1) 利用非线性弹簧单元 **Combin 39**

**Combin 39** 弹簧单元可以很方便的设定界面上的剪力-滑移关系。并且有多种滑移模型可供选择，是一种很实用的界面单元形式。

2) 利用接触单元

当混凝土和型钢表面可能发生脱离，界面上又没有设置剪力连接件的情况下，混凝土和型钢之间的接触就需要考虑。**ANSYS** 软件内部提供了点与点接触，点与面接触，面与面接触等多种接触分析模型。在综合对比了各种接触模型后，作者推荐使用空间点对点接触分析。因为在实际混凝土结构中，型钢和混凝土之间的脱开缝隙比较小，相对滑移也比较小，用点对点接触分析完全可以模拟二者之间的相互关系。而其效率和收敛速度都要高于其他的接触形式。

### 四、 实例分析

#### 4.1、 异型柱框架结构

某带斜支撑异型柱框架如图 1 所示，在本例中，因为需要了解异型柱框架在外力作用下的整个荷载位移关系，及混凝土和钢筋应力变化及分布情况，因而需要建立混凝土的空间实体模型。同时考虑到异型柱中钢筋分布都沿着混凝土的外边缘，且钢筋应力是我们关心的重点，因此，我们选择位移协调的分离式钢筋模型。用 **link 8** 单元代表结构中的钢筋。有限元分析正确模拟了斜支撑对框架的刚度和承载力的影响，说明了斜支撑在改变框架受力机理中的作用，并提出了设计建议。最后得到框架柱和斜支撑中钢筋应力分布如图 2 所示。

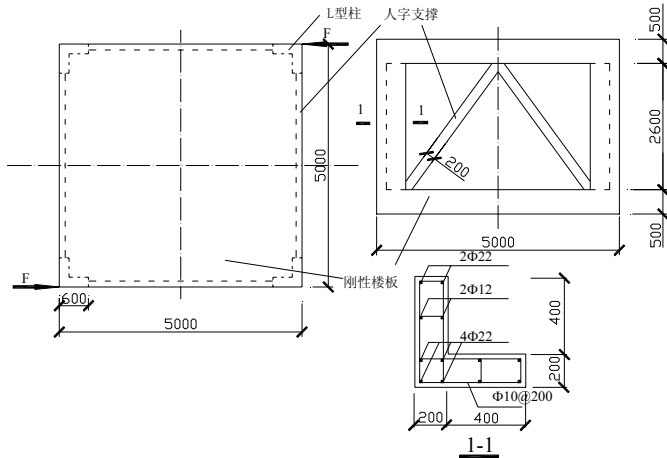


图 1、 异型柱框架及其配筋情况（单位：毫米）

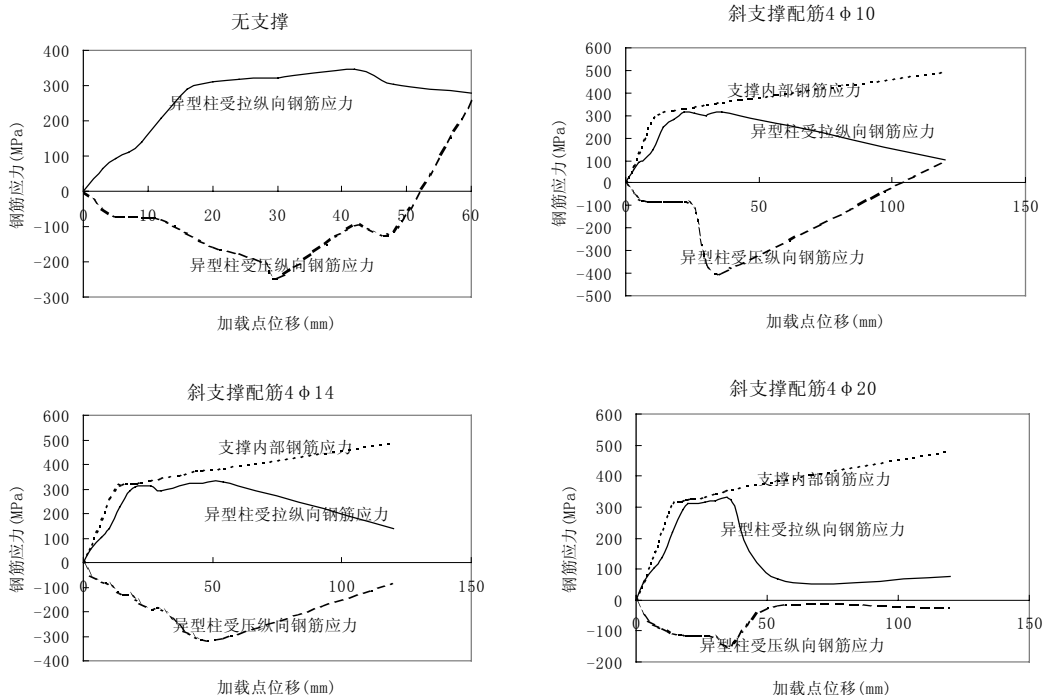


图 2、 钢筋应力-位移关系

### 4.2、预应力叠合梁结构

某预应力型钢—混凝土叠合梁如图 3 所示，其中型钢和混凝土面板是通过栓钉相连接。考虑到上部混凝土板内钢筋分布较均匀，因此使用了整体式钢筋混凝土模型，直接在实参数中定义配筋率，而连接型钢和混凝土的栓钉由于抗剪刚度比较小，因此应该考虑其滑移的影响。因此我们选用了非线性弹簧单元 Combin39 来模拟栓钉的影响，并设定栓钉的轴向刚度为  $k_{sd} = \frac{E_{sd} A_d}{h}$ ，剪切—滑移关系为  $Q = Q_u (1 - e^{-0.702S})^{0.4}$ ，这里  $Q_u = 0.5 A_d \sqrt{E_c f_c'} \leq A_d f_{du}$ ， $E_{sd}$  为栓钉弹模， $A_d$  为栓钉截面积， $h$  为栓钉长度， $S$  为滑移量， $E_c$ ， $f_c'$  为混凝土的弹性模量和抗压强度， $f_{du}$  为栓钉强度。计算得到叠合梁的荷载位移曲线如图 4 所示。得到剪力连接件的滑移度对整个构件的刚度的影响。

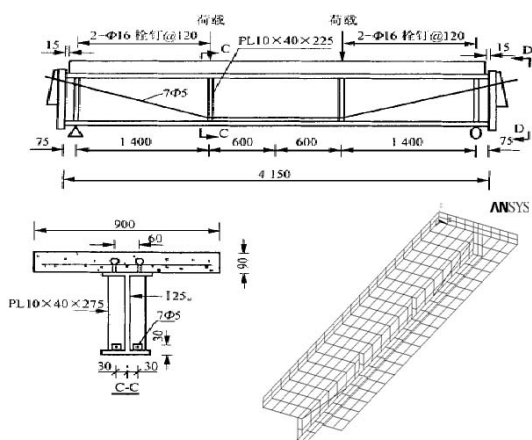


图 3、试件及有限元模型

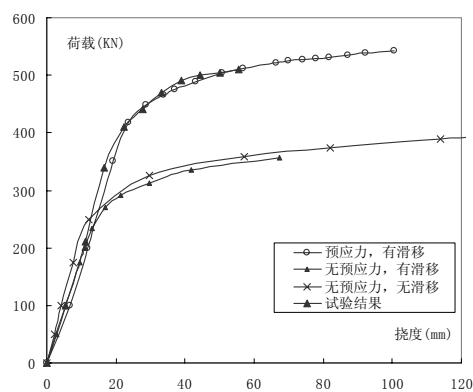


图 4、计算结果与试验结果对比

### 4.3、钢管混凝土节点

某钢管混凝土节点外形如图 5 所示。其中，梁内部的钢筋是和钢管焊接在一起的，而梁的剪力，则是通过焊接在节点底部的反牛腿传递给柱子的。考虑到钢管混凝土在受压过程中，钢管和内部的混凝土在中、低轴压水平下会脱开，同时，在剪力作用下，反牛腿和梁底部的混凝土也可能脱开；因此，我们需要在钢管、反牛腿附近引入接触分析。为了保证后期接触分析的可靠性和收敛速度，我们在建模上格外细致，保证钢筋、钢管和混凝土在各个作用节点上坐标的一致，得到的钢筋和钢管骨架如图 6 所示。并最终取得了较好的计算结果。

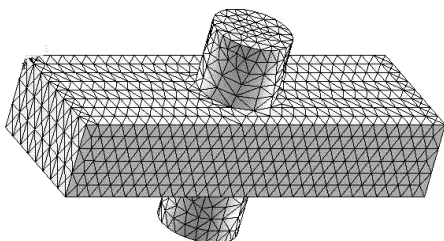


图 5、钢管柱节点模型

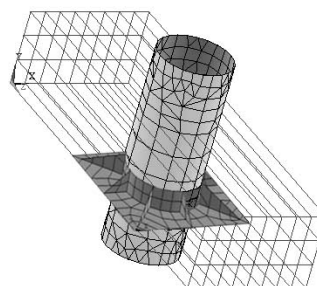


图 6、钢管及钢筋骨架模型

### 4.4、纤维包裹混凝土轴心受压柱

某复合纤维包裹混凝土柱结构如图 7 所示, 考虑对称性, 取 1/4 结构进行分析。因为复合纤维和混凝土之间通过树脂粘贴, 具有良好的粘结界面, 因此, 可以不必考虑二者之间的错动, 可以让纤维布和混凝土之间共用节点, 位移协调。由于纤维布本身很薄, 因此, 应该选用没有抗弯刚度的 Shell 41 膜结构单元。计算得到柱子荷载位移关系曲线如图 8 所示。可见本方法可以取得良好的效果。

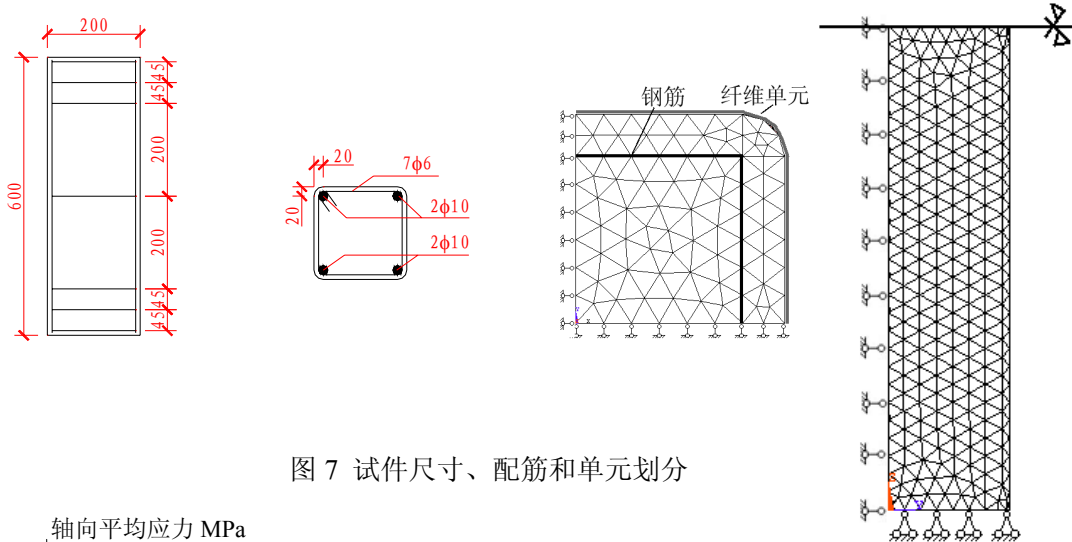


图 7 试件尺寸、配筋和单元划分

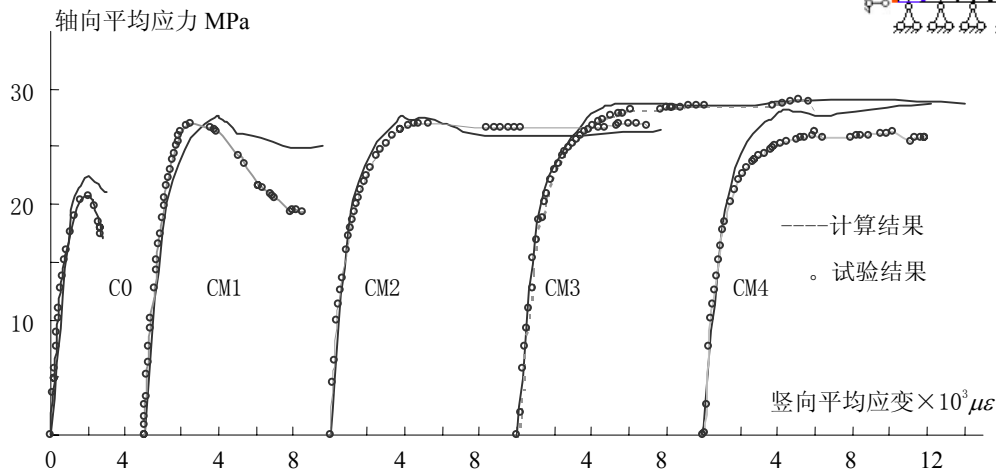


图 8 竖轴向应力-应变关系对比

## 五、 需要注意的问题

- 1) 由于 SOLID 65 单元本身是基于弥散裂缝模型和最大拉应力开裂判据, 因此在很多情况下会因为应力集中而使混凝土提前破坏, 从而和试验结果不相吻合, 因此, 在实际应用过程中应该对单元划分进行有效控制, 根据作者经验, 当最小单元尺寸大于 5cm 时, 就可以有效避免应力集中带来的问题;
- 2) 支座是另一个需要注意的问题。在有限元分析中, 很多时候约束是直接加在混凝土节点上, 这样很可能在支座位置产生很大的应力集中, 从而使支座附近的混凝土突然破坏, 造成求解失败。因此, 在实际应用过程中, 应该适当加大支座附近单元的尺寸或者在支座上加一些弹性垫块, 避免支座的应力集中;
- 3) 六面体的 SOLID 65 单元一般比四面体的单元计算要稳定且收敛性好, 因此, 只要条件允许, 应该尽量使用六面体单元;
- 4) 正确选择收敛标准, 一般位移控制加载最好用位移的无穷范数控制收敛, 而用

力控制加载时可以用残余力的二范数控制收敛。在裂缝刚刚出现和接近破坏的阶段, 可以适当放松收敛标准, 保证计算的连续性;

## 六、 结论

ANSYS 软件中提供了专门针对混凝土材料的有限元单元 SOLID 65, 并提供了相应的强度准则和本构关系, 将其和 ANSYS 中其他各种单元进行正确的组合使用, 可以用于分析各种复杂的混凝土结构和构件。如果处理好建模, 分网, 求解中的各种细节问题。将取得良好结果。

### 参考文献:

- 1、 Ansys 使用手册, 美国 Ansys 公司驻京办事处
- 2、 实用工程数值模拟技术及其在 Ansys 上的实践, 王国强, 西北工业大学出版社, 2000.4
- 3、 过镇海, 钢筋混凝土原理, 清华大学出版社, 1999, P. 19~21, P. 134~135
- 4、 江见鲸, 钢筋混凝土结构非线性有限元分析, 1984, P. 91~116
- 5、 陆新征, 江见鲸, 利用斜支撑提高异型柱框架结构抗扭性能的研究, 工业建筑, 2002. 6. P. 39~41

### 附录:

```

/PREP7
!*
ET,1,SOLID65
!*
R,1,3,,,3,
RMORE,,,3,,,
!*
UIMP,1,EX,,,30e3,
UIMP,1,NUXY,,,2,
UIMP,1,ALPX,,,,
UIMP,1,REFT,,,,
UIMP,1,MU,,,,
UIMP,1,DAMP,,,,
UIMP,1,DENS,,,,
!*
UIMP,3,EX,,,200e3,
UIMP,3,NUXY,,,27,
UIMP,3,ALPX,,,,
UIMP,3,REFT,,,,
UIMP,3,MU,,,,
UIMP,3,DAMP,,,,
UIMP,3,DENS,,,,
!*
TB,MKIN,1,,,,
!*
TBMODIF,1,2,0.0005
TBMODIF,1,3,0.001
TBMODIF,1,4,0.002
TBMODIF,1,5,0.0025
TBMODIF,1,6,0.0038
TBMODIF,2,2,15
TBMODIF,2,3,24
TBMODIF,2,4,30
TBMODIF,2,5,29
TBMODIF,2,6,22
TB,CONCR,1,,,,
!*
TBMODIF,2,1,0.6
TBMODIF,3,1,0.95
TBMODIF,4,1,3
TBMODIF,5,1,28
TB,BKIN,3,,,,
!*
TBMODIF,2,1,210
TBMODIF,3,1,2e3
    
```