

# 建筑结构分析与设计软件

**ETABS 2016®**

## 案例教程



北京筑信达工程咨询有限公司  
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043



# 版 权

计算机程序 ETABS 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Computers and Structures, Inc. (中文版版权同属于北京筑信达工程咨询有限公司)。如果没有 CSI 和北京筑信达工程咨询有限公司的预先书面许可，未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

北京筑信达工程咨询有限公司版权所有©, 2016.

# 说 明

本教程将通过具体的案例，介绍应用 ETABS 2016 进行弹塑性时程分析的基本流程及相关设置。“模型概况”是对案例的简单介绍；“主要操作流程”是对建模过程的简要描述；“要点详解”是对相关参数或方法的详细说明。本教程未涉及软件操作的详细讲解，相关内容请参考 ETABS 联机帮助或相关使用手册。

我们将持续丰富案例种类。对于本教程的内容和需要增加的案例类型，欢迎您提出您的意见和建议，不胜感谢！联系方式如下：

技术热线：010-6892 4600 - 200

技术邮箱： [support@cisec.cn](mailto:support@cisec.cn)

## 目 录

1 模型概况.....	2
1.1 材料属性.....	2
1.2 截面信息.....	2
1.3 荷载信息.....	3
2 主要操作流程.....	3
2.1 建立基本模型.....	3
2.2 定义、指定塑性铰.....	9
2.3 定义、指定分层壳.....	13
2.4 定义、绘制埋设梁.....	15
2.5 定义时程工况.....	16
2.6 定义时程函数.....	20
2.7 运行分析.....	21
2.8 查看时程分析结果.....	22
3 要点详解.....	28
3.1 默认铰、自定义铰、生成铰的区别.....	28
3.2 M3 铰定义参数说明.....	28
3.3 默认 M3 铰的计算原则.....	29
3.4 分层壳属性定义.....	30
3.5 非线性单元布置建议.....	31
3.6 时间积分方法.....	32
3.7 非线性参数说明.....	32



---

## 框架-核心筒结构弹塑性时程分析

---

本教程旨在指导用户利用 ETABS 2016 完成对框架-核心筒结构的弹塑性时程分析，包括相关属性定义、指定，荷载加载，工况设置，结果查看等工作。希望通过具体操作使用户了解并掌握 ETABS 2016 静力弹塑性分析的基本功能，如塑性铰、分层壳定义，弹塑性时程工况设置，结果性能查看等。本文对结构构件塑性行为的模拟方法有一定代表性，但并不是唯一。用户在深入了解程序的技术条件后，可根据实际工程情况灵活应用。

限于篇幅，本文未对每一步的实现做具体而完整的说明，仅给出了关键步骤的说明或提示。所以用户可能需要在熟悉 ETABS 2016 的基本操作之后再使用本手册。关于基本操作，大家可以参考《ETABS 案例教程——混凝土框架-剪力墙结构》和《ETABS 案例教程——钢结构》（下载地址：<http://www.cisec.cn/Support/CaseCourse.aspx>），或者软件自带的教程手册。

依本教程可创建如图 1 中所示模型，具体模型参数见下文。

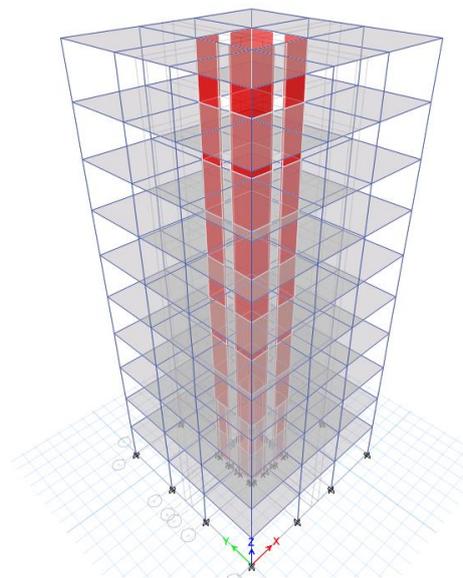


图 1 框架-核心筒结

## 1 模型概况

如图 1 所示，案例模型为框架-核心筒结构，由框架梁柱，核心筒以及楼板等组成。结构总体布局如下：

- ◆ 模型共 10 层，每层层高为 4 米；
- ◆ X 向共 3 跨，跨度分别为 4 米、5 米、4 米；
- ◆ Y 向布置与 X 向相同；

其中，中部 5m X 5m 为核心筒，连梁跨度为 1 米，居中布置；左右墙肢长度均为 2 米具体布置见图 2。

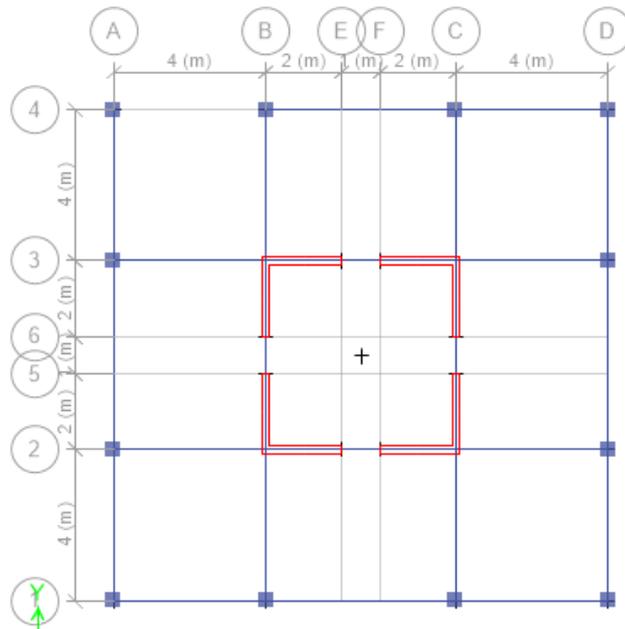


图 2 结构平面布置

### 1.1 材料属性

本模型混凝土材料统一采用 C40，钢筋材料统一采用 HRB400。材料的属性均采用默认值。

### 1.2 截面信息

框架截面信息如下表所示：

截面类型	截面名称	尺寸(mm)	配筋信息		
			净保护层厚度 (mm)	箍筋直径 (mm)	纵筋
框架柱	KZ400X400	400 X 400	30	10	12φ20
框架梁	KL200X400	200 X 400	30	10	顶部 4φ22 底部 4φ18

连梁	LL200X400	200 X 400	30	10	顶部 4φ22 底部 4φ22
埋设梁	Embedded_Beam	200 X 400	——	——	——

注：此处的配筋信息与塑形较属性密切相关，要点详解中将解释程序计算塑形较属性的原则。

剪力墙截面信息如下表所示：

截面类型	截面名称	单元类型	混凝土层厚度 (mm)	竖向分布钢筋配筋率
非底部加强区剪力墙	W200	薄壳	200	——
约束边缘构件剪力墙	W200_Layer_Edge	分层壳	200	4%
非约束边缘构件剪力墙	W200_Layer	分层壳	200	0.3%

楼板名称为 F100，采用膜单元，厚度为 100mm。

### 1.3 荷载信息

Dead、Live 荷载模式下各层楼面均布荷载均为  $5\text{kN/m}^2$ 。

## 2 主要操作流程

### 2.1 建立基本模型

该部分仅涉及模型的弹性属性，弹塑性属性将在校核模型无误后添加。

#### 定义楼层、轴网

- ◆ 楼层和轴网信息可参考**模型概况**一节的内容。
- ◆ 命令为：编辑>编辑楼层、轴网。
- ◆ 具体的楼层及轴网信息见图 3、4。

楼层	层高 m	标高 m	控制楼 层	相似于	拼接楼 层	接合高度 m
Story10	4	40	是	None	否	0
Story9	4	36	否	Story10	否	0
Story8	4	32	否	Story10	否	0
Story7	4	28	否	Story10	否	0
Story6	4	24	否	Story10	否	0
Story5	4	20	否	Story10	否	0
Story4	4	16	否	Story10	否	0
Story3	4	12	否	Story10	否	0
Story2	4	8	否	Story10	否	0
Story1	4	4	否	Story10	否	0
Base		0				

图 3 楼层信息



图 4 轴网信息

### 定义材料

- ◆ 材料信息可参考材料属性一节的内容。
- ◆ 命令为：定义>材料属性。
- ◆ 模型采用的材料见图 5。

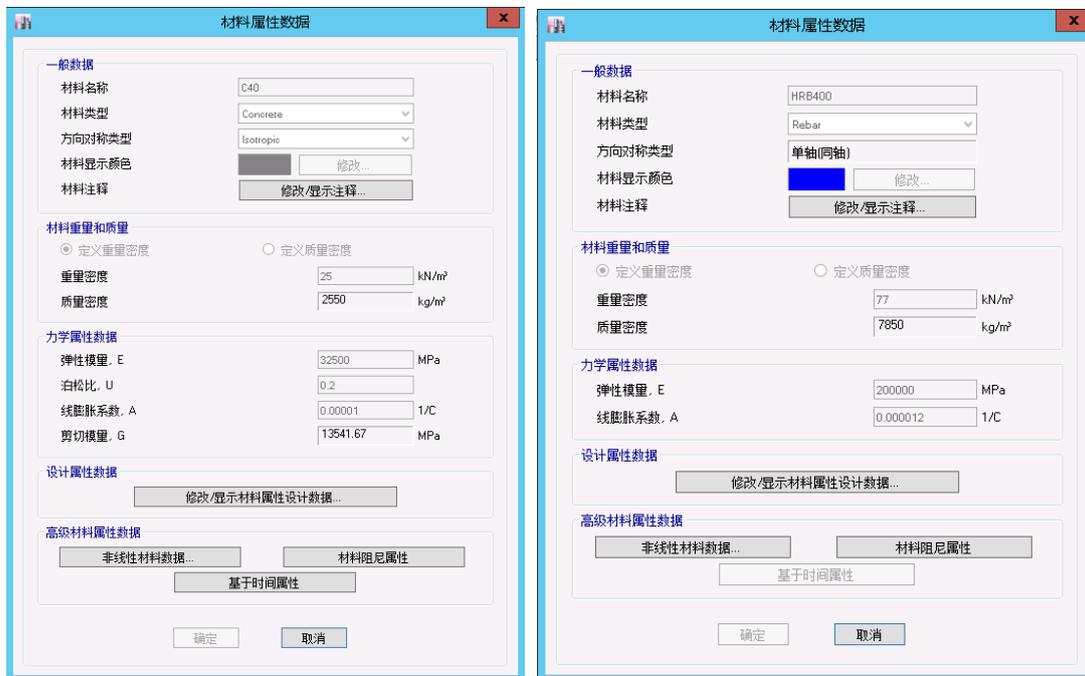


图 5 材料属性

### 定义截面

- ◆ 截面信息可参考截面信息一节的内容。
- ◆ 定义框架截面的命令为：定义>截面属性>框架截面。
- ◆ 定义的框架截面见图 6、7、8。

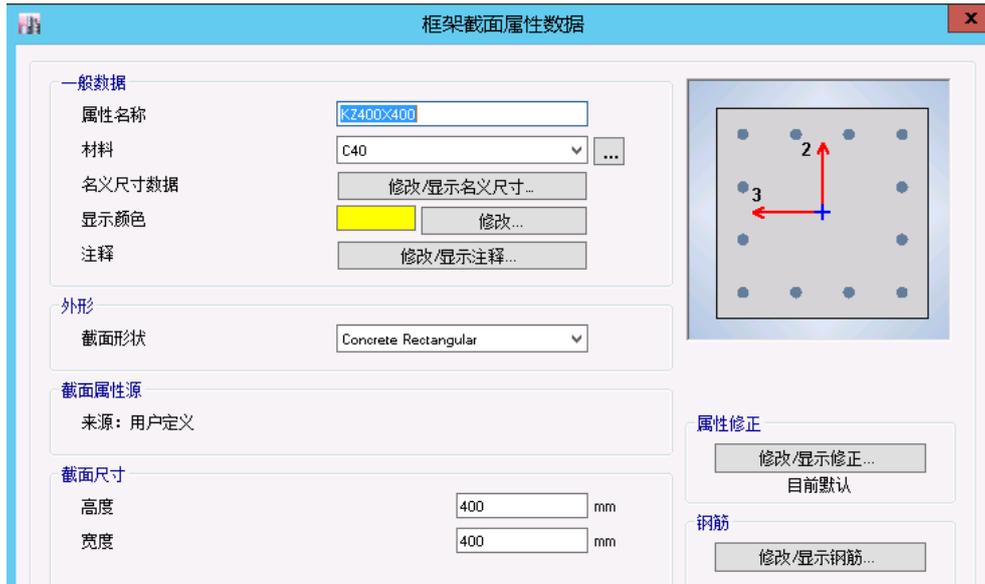


图 6 框架柱截面

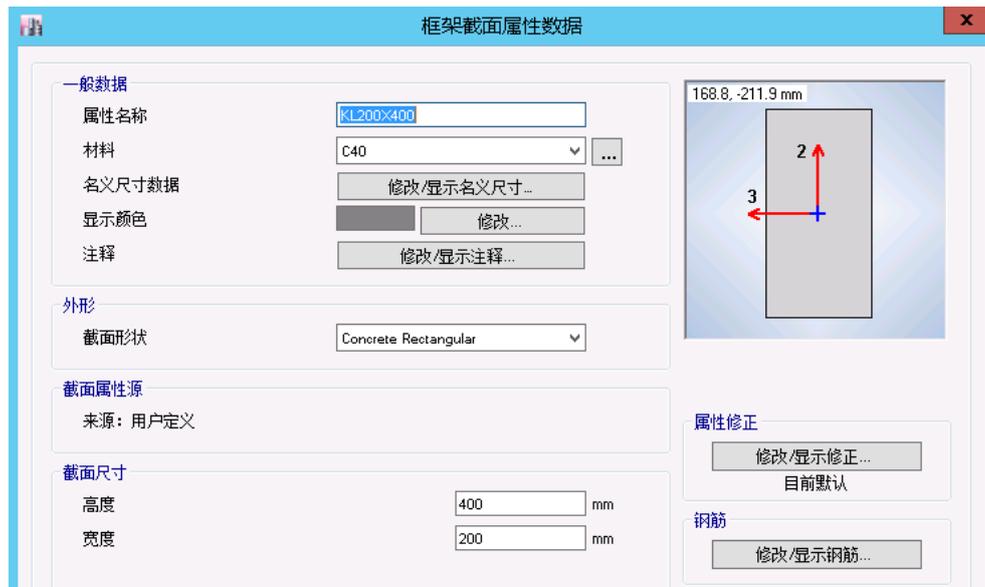


图 7 框架梁截面



图 8 连梁截面

- ◆ 定义楼板截面的命令为：定义>截面属性>楼板截面。
- ◆ 定义的楼板截面见图 9。



图 9 楼板截面

- ◆ 定义剪力墙截面的命令为：定义>截面属性>墙截面。
- ◆ 定义的剪力墙截面（弹性薄壳）见图 10。



图 10 非底部加强区剪力墙截面

注：弹性分析时，剪力墙采用统一的截面，待校核模型无误后再添加分层壳。

### 绘制对象

在平面视图中即可完成该模型的对象绘制工作；通过**捕捉**功能可以实现精确建模；通过**一层/相似层/所有层**属性间的切换，可以提高建模的效率。构件的定位可参考图 1、2。

绘制柱可采用命令：绘图>绘制梁/柱/支撑对象>快速绘制柱；

绘制梁、连梁可采用命令：绘图>绘制梁/柱/支撑对象>快速绘制梁/柱 或 绘图>绘制梁/柱/支撑对象>绘制梁/柱/支撑对象；

绘制剪力墙可采用命令：绘图>绘制楼板/墙对象>绘制墙 或 绘图>绘制楼板/墙对象>快速绘制墙；

绘制楼板可采用命令：绘图>绘制楼板/墙对象>绘制楼板/墙对象；

### 单元剖分

一般情况下，框架对象不需要指定剖分，面对象则需要指定剖分选项。程序对所有对象都设有默认剖分选项。对于本例，楼板的默认剖分选项是合适的，剪力墙需指定其剖分尺寸。

对剪力墙指定剖分选项的命令为：**指定>壳>墙自动网格划分选项**，具体参数见图 11：

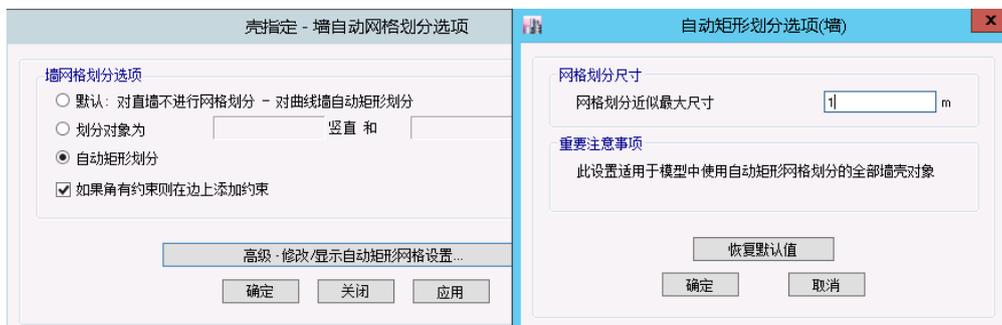


图 11 剪力墙剖分选项

注：指定剖分选项前需要选中剪力墙对象。剖分尺寸不易过细，通常 1 米至 2 米即可。

## 支座条件

命令为：**指定>节点>约束**，具体参数见图 12：



图 12 支座条件

注：指定支座条件前需要选中底部的所有节点。

## 指定荷载

- ◆ 结构的荷载信息详见**荷载信息**一节。
- ◆ 命令为：**指定>壳荷载>均布**。

注：指定均布荷载前需要选中楼板对象。

## 定义质量源

质量源定义结构质量矩阵的来源，此处的定义对应规范中的重力荷载代表值，定义质量源的命令为：**定义>质量源**，具体参数见图 13：

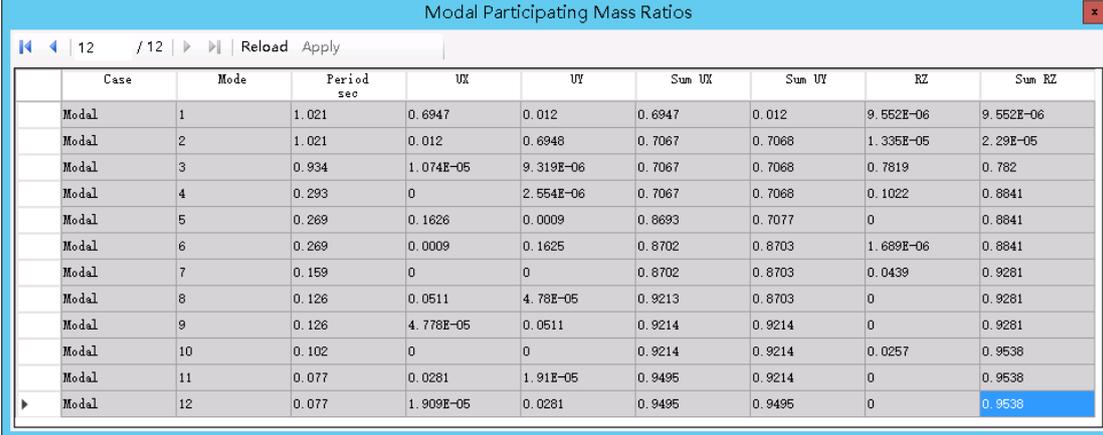


图 13 质量源

## 校核模型

通过上述步骤，我们已经建立了基本的弹性模型。为校核建模的正确性，运行模态分析并查看其结果。若得到的结果与图 14 相差较远，则需仔细检查并修改模型。

- ◆ 运行分析的命令为：**分析>运行分析**；
- ◆ 查看表格结果的命令为：**显示>显示表格**。



Case	Mode	Period sec	UX	UY	Sum UX	Sum UY	RZ	Sum RZ
Modal	1	1.021	0.6947	0.012	0.6947	0.012	9.552E-06	9.552E-06
Modal	2	1.021	0.012	0.6948	0.7067	0.7068	1.335E-05	2.29E-05
Modal	3	0.934	1.074E-05	9.319E-06	0.7067	0.7068	0.7819	0.782
Modal	4	0.293	0	2.554E-06	0.7067	0.7068	0.1022	0.8841
Modal	5	0.269	0.1626	0.0009	0.8693	0.7077	0	0.8841
Modal	6	0.269	0.0009	0.1625	0.8702	0.8703	1.689E-06	0.8841
Modal	7	0.159	0	0	0.8702	0.8703	0.0439	0.9281
Modal	8	0.126	0.0511	4.78E-05	0.9213	0.8703	0	0.9281
Modal	9	0.126	4.778E-05	0.0511	0.9214	0.9214	0	0.9281
Modal	10	0.102	0	0	0.9214	0.9214	0.0257	0.9538
Modal	11	0.077	0.0281	1.91E-05	0.9495	0.9214	0	0.9538
Modal	12	0.077	1.909E-05	0.0281	0.9495	0.9495	0	0.9538

图 14 模态周期、质量参与系数

## 2.2 定义、指定塑性铰

框架构件的材料非线性是通过塑性铰来体现的，所以在进行弹塑性分析前需要先定义并指定塑性铰。

### 框架截面配筋信息

本例对框架梁、柱采用默认铰属性。要生成默认铰属性，程序需要知道截面的配筋信息。程序有两种读入配筋信息的方式：一是在定义截面时由用户输入；二是程序完成构件设计后自动读取框架的设计结果。本例采用第一种方式。为此，补充如图 15、16 所示的配筋信息。

注：筑信达公司开发的配筋导入工具 P2ERebar 可快速导入实配钢筋信息。



**框架截面属性配筋数据**

**设计类型**

P-M2-M3设计(柱)

仅M3设计(梁)

**钢筋材料**

纵筋: HRB400

箍筋(绑扎): HRB400

**到纵筋合力中心的保护层厚度**

顶部钢筋: 51 mm

底部钢筋: 49 mm

**对延性梁钢筋面积覆盖**

I端顶部钢筋: 1520 mm<sup>2</sup>

J端顶部钢筋: 1520 mm<sup>2</sup>

I端底部钢筋: 1017 mm<sup>2</sup>

J端底部钢筋: 1017 mm<sup>2</sup>

图 15 KL400X200 钢筋信息



图 16 KZ400X400 钢筋信息

### 定义纤维铰

由于对框架梁、连梁采用默认铰属性，故仅需定义柱纤维 P-M2-M3 铰属性。

- 定义纤维铰的命令为： 定义>截面属性>框架非线性铰。
- 具体参数见图 17。

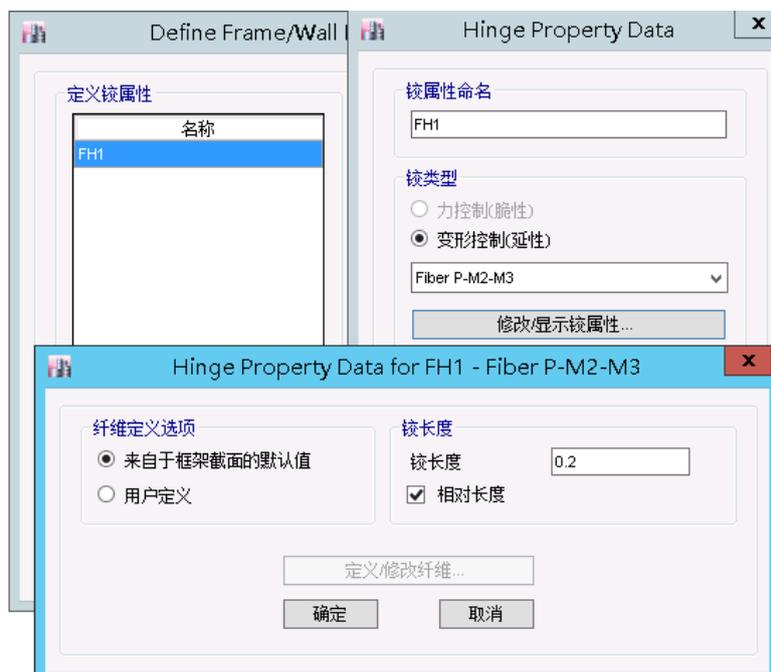


图 17 纤维铰参数

## 指定铰属性

本例对所有框架柱两端（对应 KZ400X400 截面）指定纤维 P-M2-M3 铰；对所有框架梁和连梁两端（对应 KL200X400 截面和 LL200X400 截面）指定默认的 M3 铰。

指定铰属性的命令为：**指定>框架>铰**；

- ◆ 在**铰属性**下拉列表中选择铰属性名称，**相对距离**编辑框中填写塑性铰的相对位置，此数值应根据工程实际情况进行确定。本例中对梁、柱两端取为 0.1 和 0.9，对连梁两端取为 0 和 1。点击**添加**按钮即完成一次指定。
- ◆ 对默认铰属性，在**铰属性**下拉列表中选择**自动**。
- ◆ 对纤维铰属性，在**铰属性**下拉列表中选择 FH1。

指定框架住纤维 P-M2-M3 铰的参数见图 18：



图 18 纤维 P-M2-M3 铰

指定框架梁默认 M3 铰的参数见图 19：

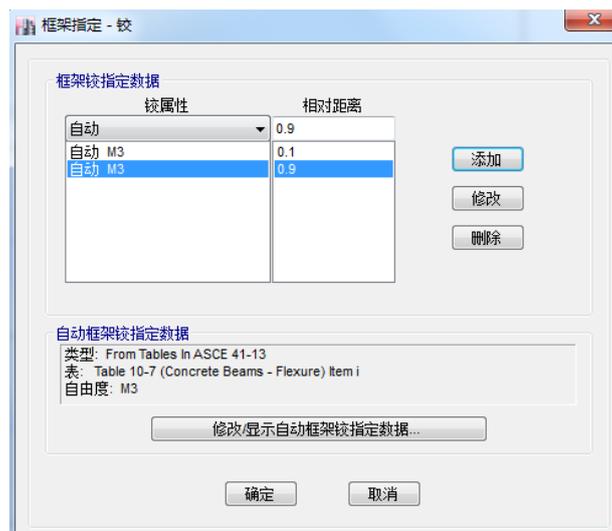


图 19 框架梁默认 M3 铰

指定连梁默认 M3 铰的参数见图 20：

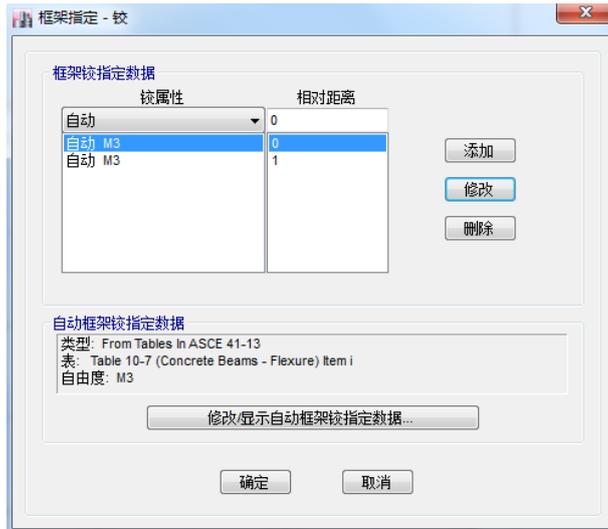


图 20 连梁默认 M3 铰

### 查看铰属性

指定完框架构件的铰属性之后，就可以查看铰属性（见图 21）。只有自定义的铰属性和生成的铰属性可以查看。关于默认铰、自定义铰和生成铰的关系请参考要点详解。

- ◆ 查看铰属性的命令为：**定义>截面属性>框架非线性铰**，与定义铰的命令相同。
- ◆ 勾选**显示铰细节**，程序会显示关于铰属性的详细信息，包括铰名称，铰类型，铰行为（力控制或位移控制），是否为生成的铰，铰属性来源等信息；
- ◆ 勾选**显示生成铰**，程序会显示（由默认铰或者自定义铰）生成的铰属性。

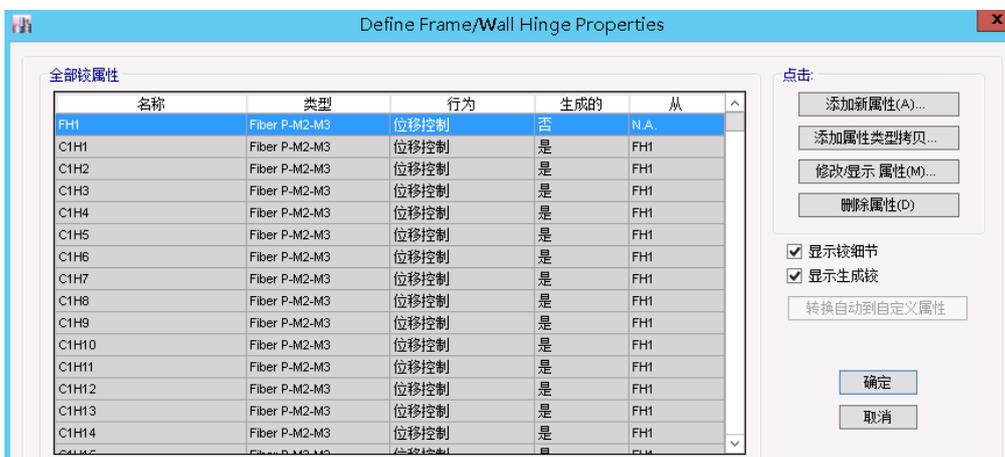


图 21 生成的铰属性

- ◆ 选择某个铰属性名称后，点击**修改/显示属性**，即可查看该铰的详细信息（见图 21、22）。

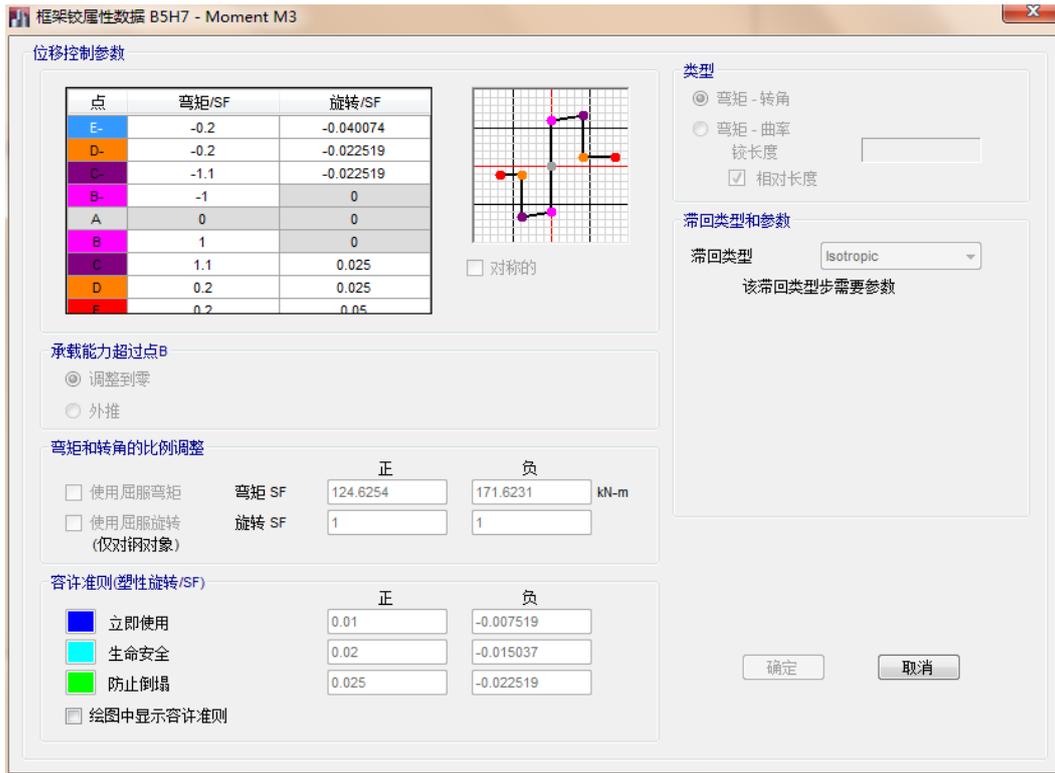


图 22 生成的 M3 铰属性

关于 M3 铰对话框中各参数的意义及默认铰属性的计算原则请参考要点详解。

### 2.3 定义、指定分层壳

剪力墙的材料非线性是通过分层壳来体现的,所以在进行弹塑性分析前需要先定义并指定分层壳属性。本例中,由于剪力墙底部受力较大,最有可能进入塑性,故仅对底部两层采用分层壳;上部诸层受力较小,进入塑性的可能性不大,可仍采用弹性薄壳。

#### 分层壳属性的定义

核心筒底部两层为底部加强区,非底部加强区采用弹性薄壳单元,截面名称为 W200。底部加强区区分约束边缘构件与非约束边缘构件,均采用分层壳模拟。其中,约束边缘构件截面名称为 W200\_Layer\_Edge,非约束边缘构件截面名称为 W200\_Layer,具体截面信息见截面信息一节。关于分层壳属性的含义参见要点详解。

定义分层壳的命令为: 定义>截面属性>墙截面,截面定义的具体参数见图 23、24:



图 23 W200\_LAYER\_EDGE 截面信息

层名	距离	厚度	建模类型	积分点数	材料	材料角	Material Behavior	材料 S11	材料 S22	材料 S12
ConcM	0	200	Membrane	1	C40	0	Directional	Linear	Nonlinear	Linear
ConcP	0	200	Plate	2	C40	0	Directional	Linear	Linear	Linear
BarM	0	0.6	Membrane	1	HRB400	90	Directional	Nonlinear	Inactive	Inactive

图 24 W200\_LAYER 截面信息

注：根据结构受力特点，核心筒不同部位采用不同的单元是合理简化模型的一个方面，有利于减少运算规模，缩小计算时间。

### 分层壳属性的指定

底部加强区中，每段墙肢左右两端各 400mm 为约束边缘构件，中间 1200mm 为非约束边缘构件，具体布置见图 25。

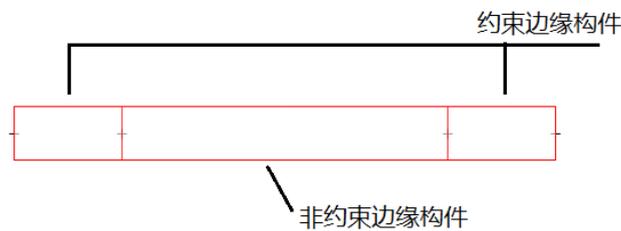


图 25 底部加强区截面示意图

操作要点如下：

- ◆ 利用 **绘图>绘制点对象** 命令，来标定不同截面所在的范围。绘制节点时通过指定**平面偏移**尺寸（参图 26）来精确的确定约束边缘构件的范围。

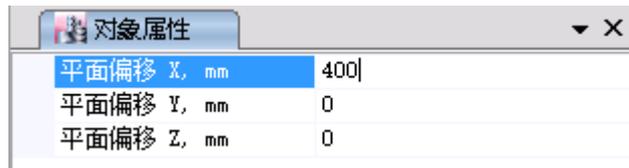


图 26 绘制点对象

- ◆ 利用 **编辑>编辑壳>分割壳（选择边上节点对象，参图 27）** 命令，在绘制的节点将核心筒进行分割。注：分割前需要选中节点和壳对象。

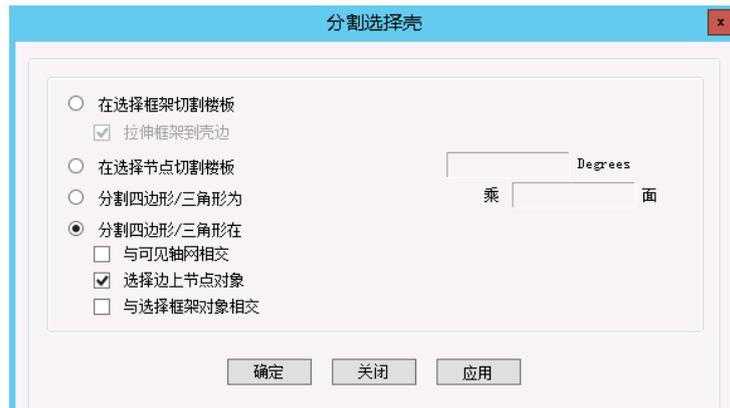


图 27 壳分割选项

- ◆ 在指定底部加强区核心筒截面属性时,可以修改相似层定义并利用相似层属性快速指定截面属性。
- ◆ 一层墙体需对分割形成的底部新节点指定固端约束。

## 2.4 定义、绘制埋设梁

由于分层壳的节点自由度与框架单元的节点自由度不同,所以在框架单元与分层壳单元相连时,需要添加埋设梁,以使两者间的内力可以合理传递。

### 定义埋设梁截面

操作要点如下:

- ◆ 本例通过复制连梁截面,然后对其进行修改得到埋设梁的截面。
- ◆ 为使梁端弯矩能正常传递到分层壳,需要放大埋设梁沿 2 方向的抗剪刚度和绕 3 轴方向的抗弯刚度,使得梁端弯矩近似为一对力偶传递到剪力墙两端。
- ◆ 为消除埋设梁对结构质量的影响,需对埋设梁的重量进行修正。
- ◆ 连梁属性修正具体参数见图 28。



图 28 连梁属性修正

- 注: 1) 刚度修正系数 10~1000 通常已足够大。不推荐使用更大数量级的数值,以免引起数值求解问题。  
2) 因质量源定义为来自指定的荷载模式,故需对截面的重量进行修正。

## 绘制埋设梁

埋设梁布置在 1、2 层楼层平面，连接连梁与分层壳单元，如图 29 所示。

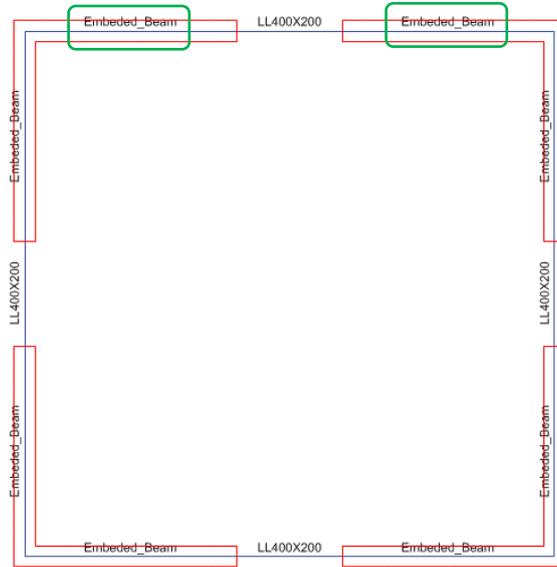


图 29 埋设梁布置图

## 2.5 定义时程工况

弹塑性时程分析需要定义前续工况和时程工况。其中，前续工况用来模拟地震作用时结构已承受的竖向荷载作用，时程工况用来分析地震作用下结构的响应。

### 前续工况的定义

前续工况所施加的荷载一般采用重力荷载代表值。为使弹塑性时程分析能够接力前续工况的内力和刚度，前续工况的工况类型应为 **Nonlinear Static（静力非线性）**。

- ◆ 定义荷载工况的命令为：**定义>荷载工况**。
- ◆ 前续工况的参数如图 30 所示：



图 30 DEAD+0.5LIVE\_NL 工况

注：1) 定义好前续工况后，应先运行并查看该工况结束后各构件的状态。若个别构件已经进入塑性状态，则需要查找原因并排除。因重力荷载下结构出现塑性是明显不合理的；2) 若定义了施工顺序工况，也可以将其作为前续工况。3) 几何非线性可视工程情况进行选择，本例为演示需要选择考虑 P- $\Delta$  效应。

### 弹塑性时程工况的定义

- ◆ 本例中时程工况名称为 THX；
- ◆ 荷载工况类型选择为 Nonlinear Direct Integration；
- ◆ 初始条件选择从非线性工况终点继续，并在非线性工况下拉列表选择 Dead+0.5Live\_NL（即上一节定义的前续工况），如图 31 所示：

图 31 弹塑性时程工况基本信息

### 加载模式

ETABS 有两种加载模式，分别为：加速度、荷载模式（见图 32），本例选择加速度。

荷载类型	荷载名称	函数	比例系数
Acceleration	U1	YERMO-1	26.9

图 32 弹塑性时程工况加载模式

- ◆ 荷载类型选择 **Acceleration**，表示地震作用按加速度输入；
- ◆ 荷载名称选择 **U1**，表示地震作用沿 X 方向；
- ◆ 比例系数需根据当前单位将地震波峰值调整至  $400\text{cm/s}^2$ ，此处输入 26.9。
- ◆ 函数的定义详见 2.6 节定义时程函数。

### 输出时间步数和时间间隔：

输出时间间隔一般取为地震波的时间间距。输出时间间隔可比地震波的时间间距小，但不建议比其大。输出时间步数应根据地震波的有效峰值或按《高层建筑混凝土结构技术规程》4.3.5 条确定。

- ◆ 本例中输出时间步为 2000 步，输出时间间隔为 0.02s，总计 40s。  
具体设置见图 33。

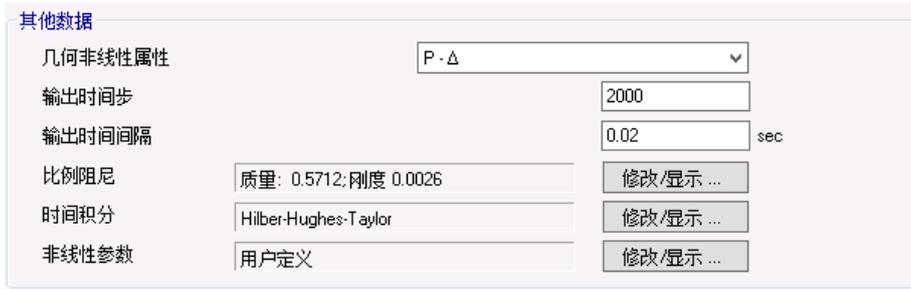


图 33 弹性时程工况其他数据

**几何非线性属性:**

定义工况是否考虑几何非线性。此处选择 **P-Δ**。

注：1) 建议在初次分析时，不考虑结构的几何非线性。待确认模型没有任何问题后，再考虑几何非线性。2) 弹性时程工况与前置的非线性静力工况的几何非线性属性应保持一致。

**比例阻尼:**

比例阻尼的设置还需要进一步的研究。本例仅给出一般性的设置。

- ◆ 第一周期点取第一周期的 0.9 倍，第二周期点取第一周期的 0.2 倍。
- ◆ 各周期点对应的阻尼比为 0.05。

具体设置见图 34。



图 34 比例阻尼选项

**时间积分:**

ETABS 中有多种时间积分方法，其中推荐使用的是 **Hilber-Hughes-Taylor** 方法（后简称 HHT 法）。HHT 法中  $\alpha$  为算法阻尼，本例取值-0.02。 具体设置见图 35。



图 35 结果保存选项

注：HHT 法中  $\alpha$  取值以及其他时间积分参数的介绍详见要点详解。

### 非线性参数

各参数的意义详见要点详解，除打开使用事件到事件步选项外，本例均采取默认值（见图 36）。



图 36 非线性参数设置

## 2.6 定义时程函数

在进行时程分析时，需要将地震波数据以时程函数的形式输入到程序中。定义时程函数的路径为：**定义>函数>时程函数**，具体参数与地震波文件的文本格式有关，本例使用的地震波文件见图 37。相关的函数设置见图 38。

- ◆ 格式类型选自由格式。
- ◆ 函数值等间距于 0.02，与地震波时间间隔相同。
- ◆ 跳过前几行为 2，为地震波头文件行数。
- ◆ 每行跳过前缀字符为 0。
- ◆ 每条线的点数为 8。

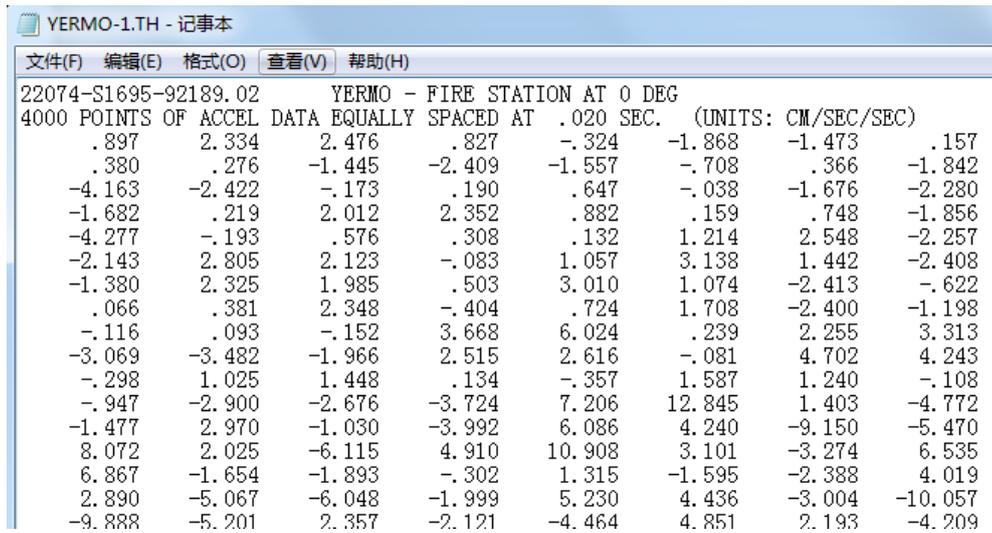


图 37 地震波文件

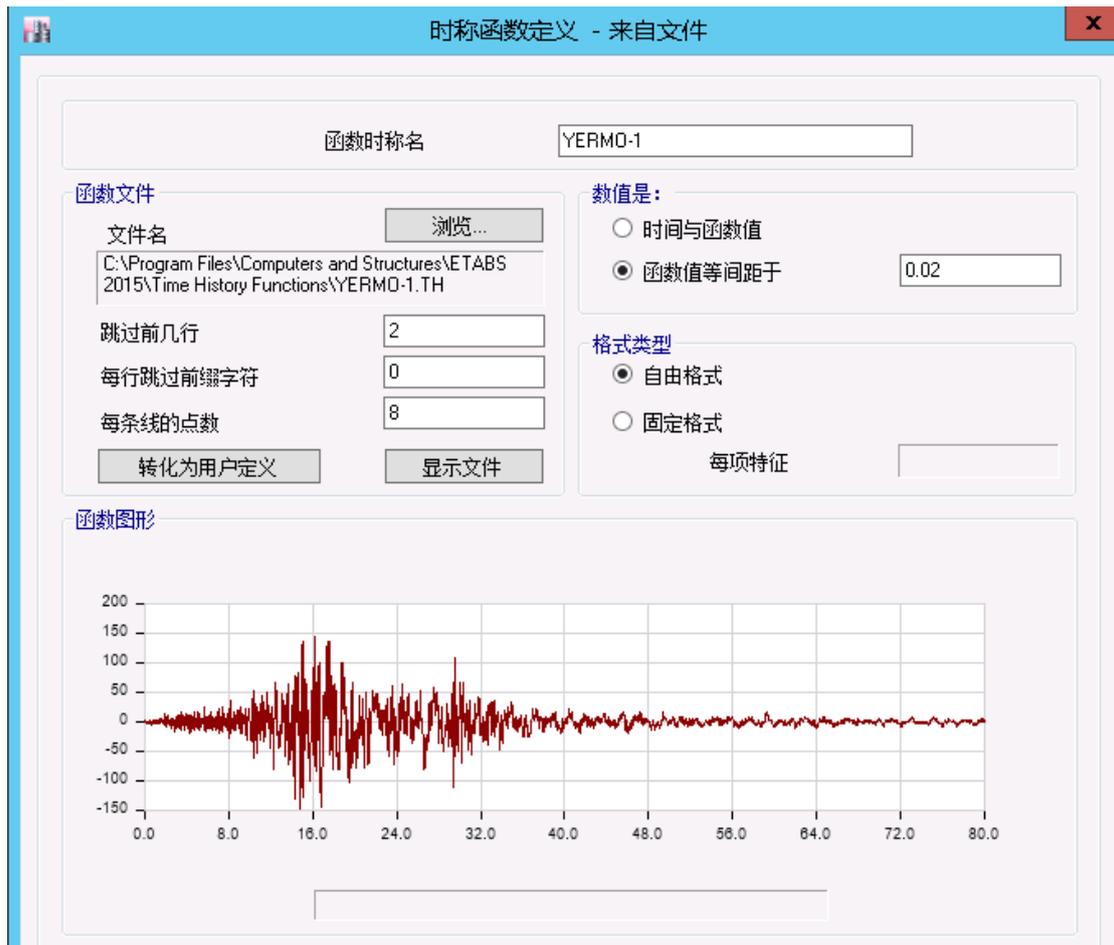


图 38 时程函数

注：1) 时程函数中的数值为无量纲数值。

## 2.7 运行分析

查看运行日志的命令为：分析>上次运行日志。如图 39 所示，非线性求解的状态主要查看红框所示内容。其中，第 1 行是所列项的名称，第 2 行一般是所列项的限值，第 3 行是当前值。

```

CASE: THX
CONTINUING FROM THE END OF CASE: DEAD+0.5LIVE_NL

TIME INTEGRATION METHOD           = HILBER-HUGHES-TAYLOR ALPHA
STIFFNESS INTEGRATION FACTOR     = 1.591812
DAMPING INTEGRATION FACTOR       = 1.060800
MASS INTEGRATION FACTOR          = 1.000000
TYPE OF GEOMETRIC NONLINEARITY   = P-DELTA
INCLUDE ELASTIC MATERIAL NONLINEARITY = YES
INCLUDE INELASTIC MATERIAL NONLINEARITY = YES
USE EVENT STEPPING                = YES
USE ITERATION                     = YES
USE LINE SEARCH                   = YES
EVENT LUMPING TOLERANCE           = 0.010000
FORCE CONVERGENCE TOLERANCE (RELATIVE) = 0.000100
LINE-SEARCH ACCEPTANCE TOLERANCE = 0.100000

Negative iterations are Constant-Stiffness
Positive iterations are Newton-Raphson


```

	Saved Steps	Null Steps	Total Steps	Iteration this Step	Relative Unbalance	Time Step Size	Current Time
Limit	2000	0	0	-10/40	1.000000	0.020000	40.000000
Cur	2000	2	2004	Conv -2	0.003367	0.020000	40.000000

图 39 分析日志

各项的含义见下表：

Saved Steps	Null Steps	Total Steps	Iteration this Step	Relative Unbalance	Time Step Size	Current Time
保存状态的数量	空步数	总步数	迭代设置	相对不平衡误差	时间步长	当前累积时间

注：Iteration this Step 一列中，第 2 行是对不同迭代方法最大迭代次数的限值（参见要点详解），第 3 行是当前的迭代次数；Time Step Size 一列中，第 2 行是初始步长，第 3 行为当前步长。

## 2.8 查看时程分析结果

通过时程分析结果可以得到结构的时程响应，并查看结构总体的性能状态。总体耗能情况可以查看**累积能量耗散图**，构件的性能状态可以查看**铰结果和壳层应力**（分层壳结果），结构的塑性发展过程可以查看**变形形状**。

### 楼层时程响应

查看楼层时程响应的命令为：**显示>绘图函数**。

- ◆ 点击**定义绘图函数**按钮（如图 40 所示）分别定义函数顶点位移 X 与基底剪力 X（如图 41 所示）。
- ◆ 选择水平与竖向方程，一般水平方程为 Time，竖向方程选择上一步所定义的函数，即可显示相应的时程曲线（如图 42 和图 43 所示）。

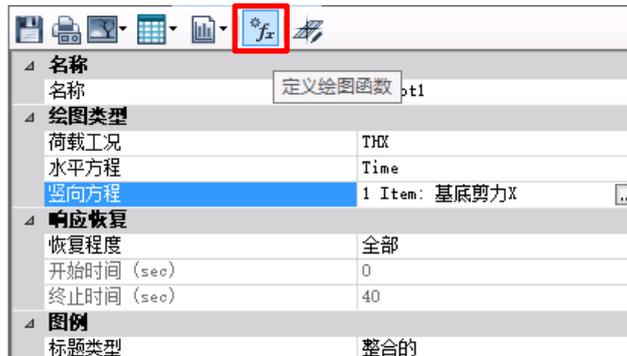


图 40 定义绘图函数

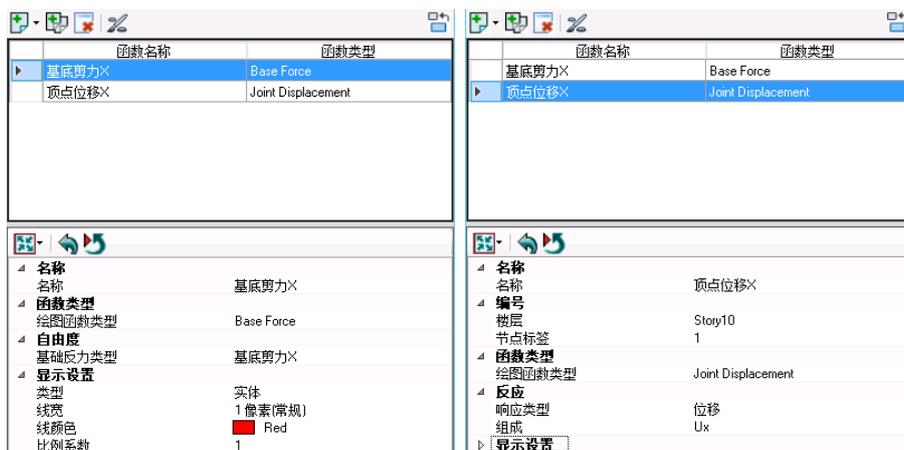


图 41 定义基底剪力与顶点位移函数

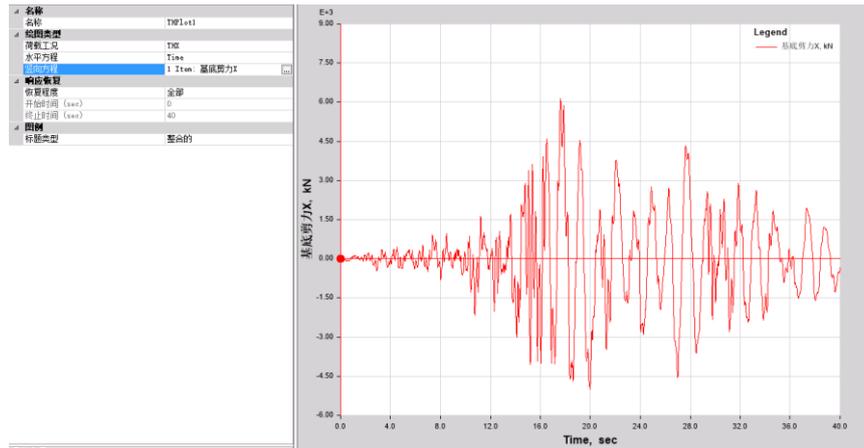


图 42 显示基底剪力时程曲线

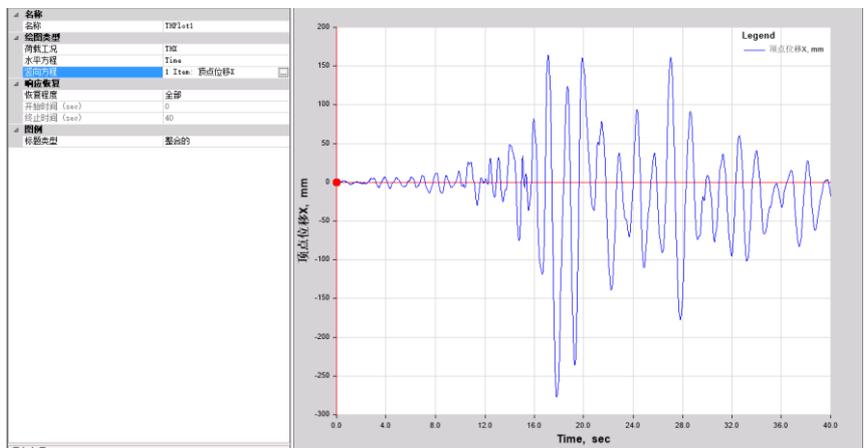


图 43 显示顶点位移时程曲线

另外，ETABS2016 中可以查看楼层时程响应动态图，命令为：**显示>楼层响应联动图**。

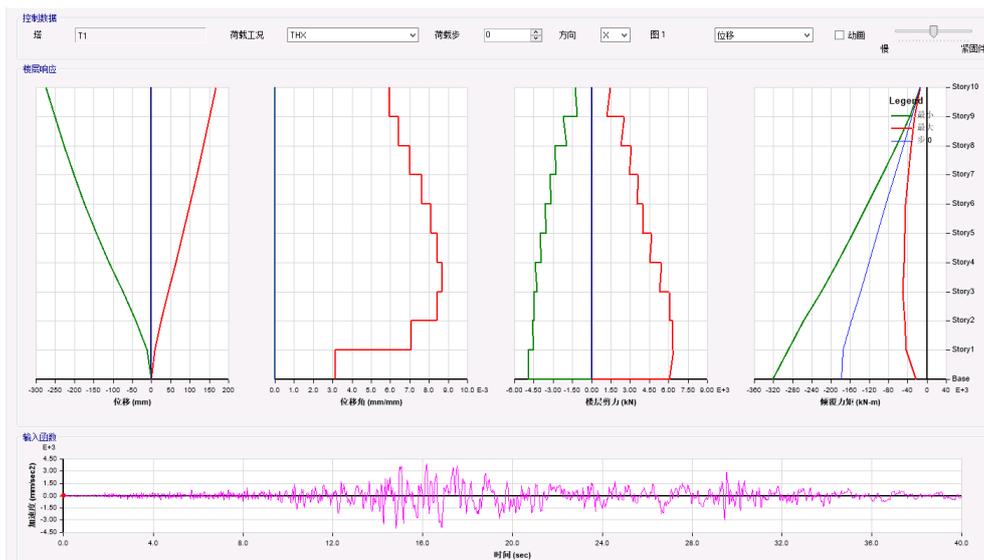


图 44 楼层响应联动图

## 楼层反应图

通过楼层的**最大层间位移**和**楼层剪力**可以知道结构在预期地震作用下的弹塑性层间位移角和剪力分布，进而判断结构是否满足规范要求。

查看最大层间位移/楼层剪力的命令为：**显示>楼层反应图**，具体参数见下图 45、46。其中，**显示类型**选最大层间位移/楼层剪力，**工况/组合**选 THX，**输出类型**可选最大/最小/绝对最大。

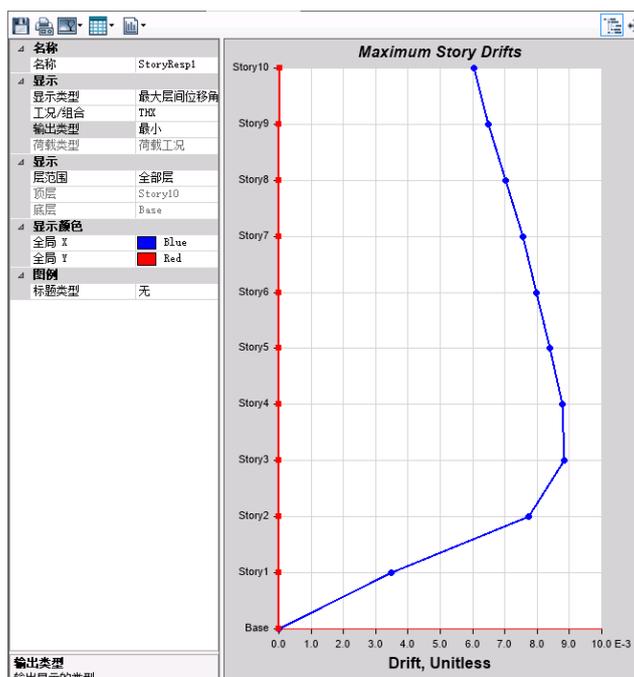


图 45 最大层间位移

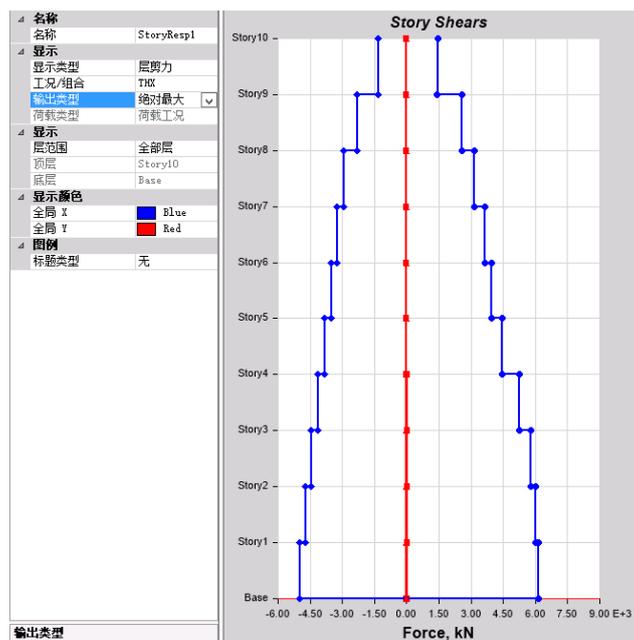


图 46 层间剪力

## 累积能量耗散图

通过显示**累积能量耗散图**可以查看结构整体的能量耗散情况。查看累积能量耗散图的命令为：**显示>累积能量分量**。ETABS2016 中可以显示 FNA 法和非线性直接积分法的能量图。如图 47 所示。

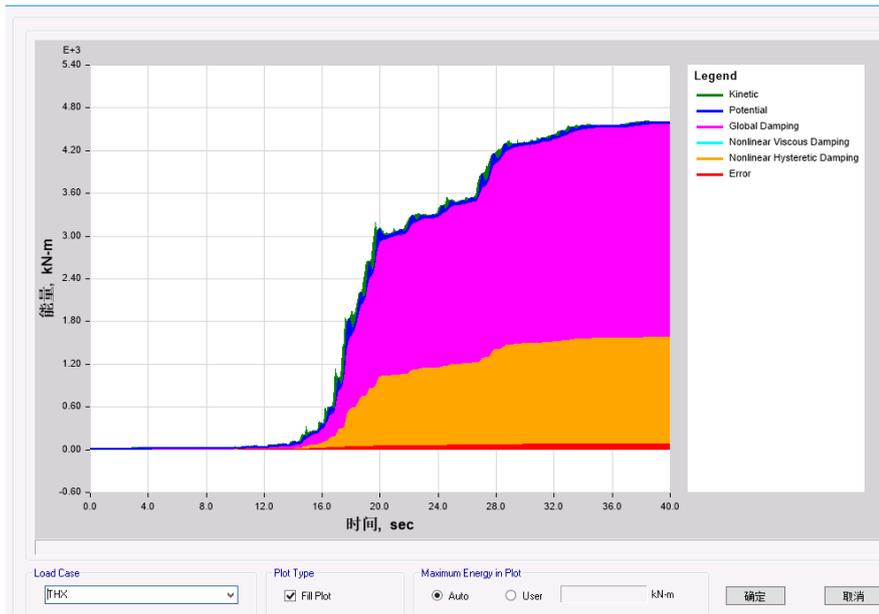


图 47 累积能量耗散图

## 变形形状

通过显示变形形状，可以查看结构在每一步荷载作用下，框架构件塑性发展的过程；通过查看结束时间的变形形状，可以知道构件的塑性状态是否满足性能目标的要求。

查看结果变形形状的命令为：**显示>变形形状**。

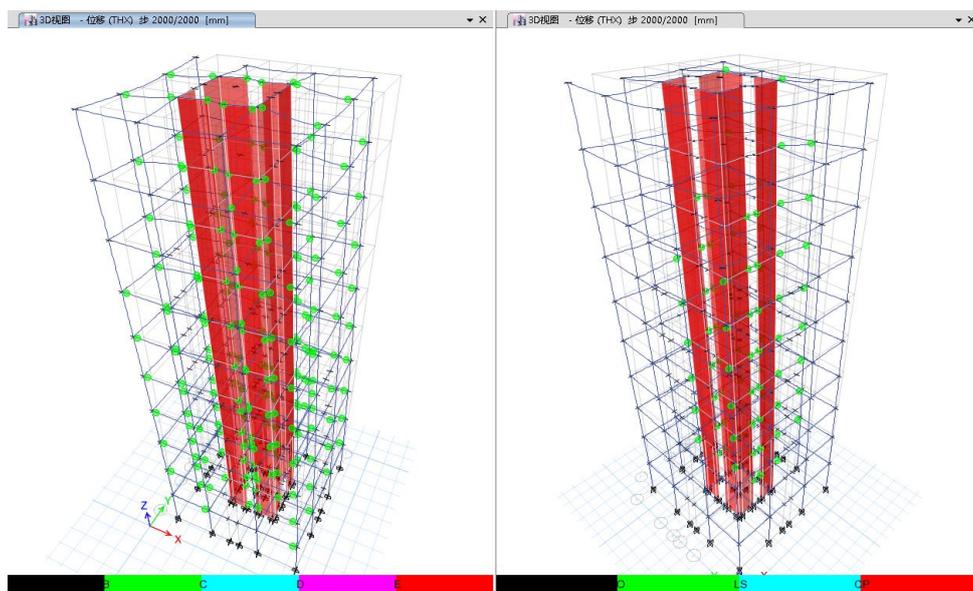


图 48 结果变形形状

## 铰结果

通过显示铰结果，可以知道每个塑性铰（对应某个截面的某种受力状态，如压弯、受弯、受剪等）在每一步荷载作用下的状态；通过查看铰结果，可以知道构件的塑性状态是否满足性能目标的要求。

查看铰结果的命令为：**显示>铰结果**。

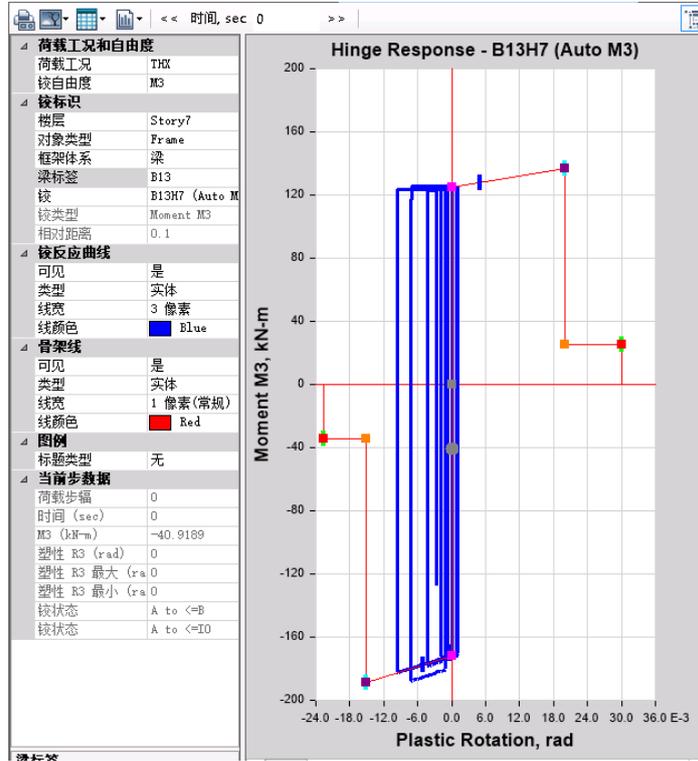


图 49 某 M3 铰结果

注意上图中构件所在的**楼层、框架体系和标签**等设置。

## 分层壳结果

通过显示分层壳应力结果，可以知道在每一步荷载作用下，塑性在剪力墙中发展的过程；通过查看顶点位移最大值对应时间点的分层壳应力结果，可以评估剪力墙在预期地震作用下的破坏程度，进而知道其是否满足性能目标的要求。

查看分层壳应力结果的命令为：**显示>力/应力图>壳应力**，具体参数可参照图 50。

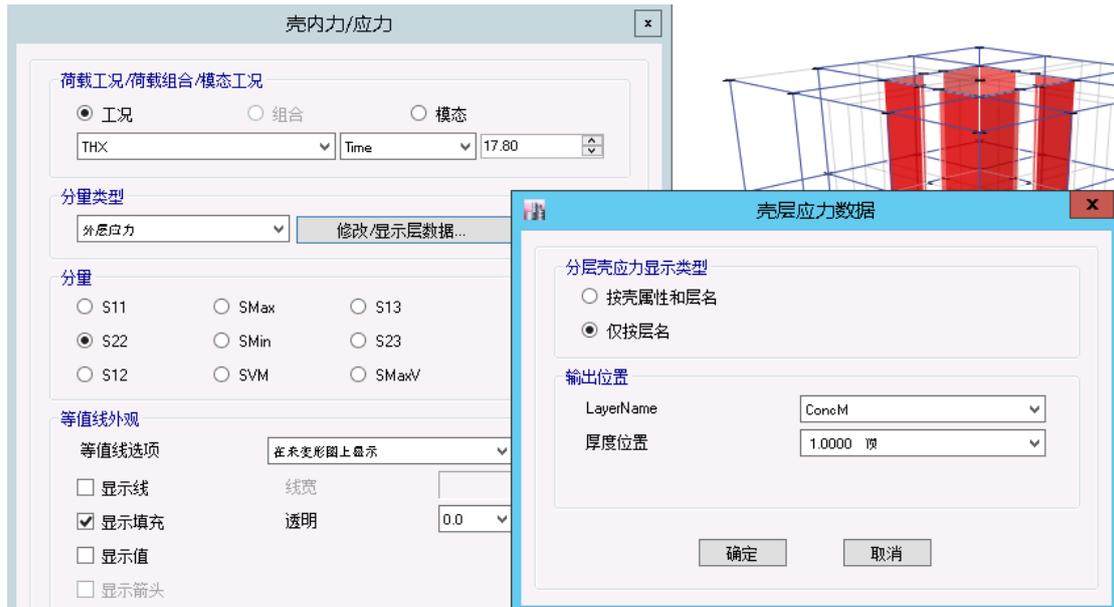


图 50 显示层应力设置

顶点位移最大值对应时间点处混凝土膜层的应力分布如图 51 所示：

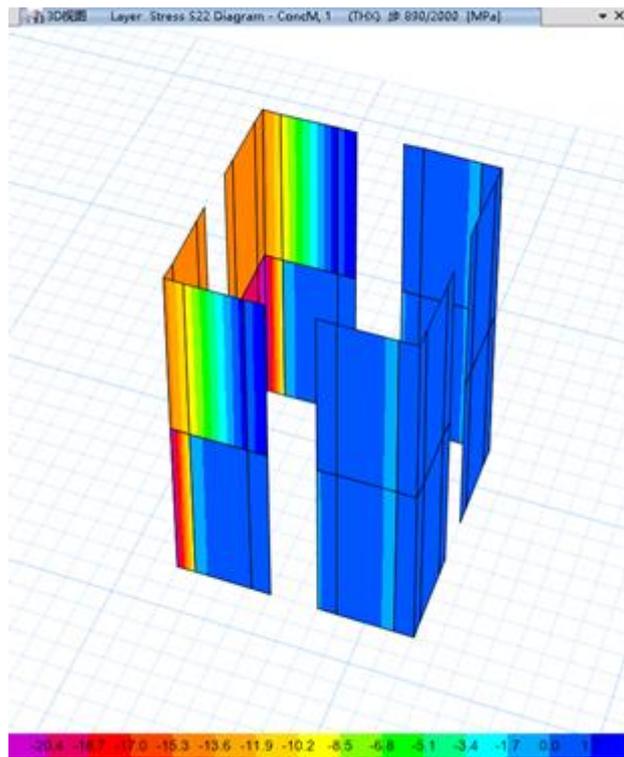


图 51 混凝土膜层应力分布

### 3 要点详解

#### 3.1 默认铰、自定义铰、生成铰的区别

顾名思义，**默认铰**的属性是由程序生成的；**自定义铰**的属性是由用户自己输入的。但即使是属性完全相同的默认铰，在赋予不同的构件后，其力学行为也会不同，所以还有**生成铰**的概念，以便于对每个铰做唯一的标识。

全部铰属性				
名称	类型	行为	生成的	从
V2	Shear V2	位移控制	否	N.A.
C16H1	Interacting P-M2-M3	位移控制	是	Auto
B7H1	Moment M3	位移控制	是	Auto

图 52 自定义铰和生成铰

- 只有默认铰和自定义铰可以指定给框架；
- 只有自定义铰和生成铰的属性可以查看；
- 可以复制由默认铰生成的铰属性并进行一定的修改而得到自定义铰。

#### 3.2 M3 铰定义参数说明

ETABS 中的塑性铰是刚塑性，所涉及的能力曲线和容许准则均针对塑性变形。

图 53 默认 M3 铰参数

**类型区域：**定义塑性铰的类型，有弯矩-转角和弯矩-曲率两种。当类型为弯矩-曲率时，需要输入塑性铰的长度。

**滞回类型：**定义动力弹塑性分析时塑性铰的滞回特性。

**位移控制参数区域和弯矩和转角的比例调整区域：**两者共同决定了塑性铰的能力曲线，即骨架曲线关键点（A、B、C、D、E）的坐标。

- ◆ **位移控制参数区域**定义了骨架曲线各点的相对位置；
- ◆ **弯矩和转角的比例调整区域**定义骨架曲线各值的比例系数，其中弯矩的比例系数一般取屈服弯矩值。

**承载能力超过点 E** 定义了当铰的受力状态超过 E 点后塑性铰的属性。

**容许准则区域**定义了各性能状态对应的塑性铰变形。

打开如图 53 的对话框，按 F1 可激活联机帮助，查看更详细的说明。

### 3.3 默认 M3 铰的计算原则

默认铰属性是按照等效应力矩法进行计算的，不同之处在于：

- ◆ 混凝土的等效应力值  $\alpha_1 f_c$  中， $\alpha_1$  取 0.85，混凝土材料指标取轴心抗压强度标准值。
- ◆ 钢筋材料指标取强度标准值。

基于上述原则，手算结果与程序的默认 M3 铰属性对比如下（见图 51、52），两种完全吻合。

$$\begin{aligned}
 b &:= 200 & h &:= 400 \\
 c_s &:= 30 & d_g &:= 10 & d_x &:= 18 & d_s &:= 22 \\
 a_{sx} &:= c + d_g + 0.5 \cdot d_x & a_{sx} &= 49 \\
 a_{ss} &:= c + d_g + 0.5 \cdot d_s & a_{ss} &= 51 \\
 A_{sx} &:= 1017 & A_{ss} &:= 1520 & f_y &:= 400 \\
 \alpha_1 &:= 0.85 & \beta_1 &:= 0.85 & f_{ck} &:= 26.8
 \end{aligned}$$

正弯矩限值：	负弯矩限值：
$x_s := \frac{f_y \cdot A_{sx}}{\alpha_1 \cdot f_{ck} \cdot b}$	$x_x := \frac{f_y \cdot A_{ss}}{\alpha_1 \cdot f_{ck} \cdot b}$
$x_s = 89.289$	$x_x = 133.45$
$M_{ux} := f_y \cdot A_{sx} \cdot (h - a_{sx} - 0.5 \cdot x_s)$	$M_{us} := f_y \cdot A_{ss} \cdot (h - a_{ss} - 0.5 \cdot x_x)$
$M_{ux} = 1.246 \times 10^8$	$M_{us} = 1.716 \times 10^8$

图 54 默认 M3 铰属性验算

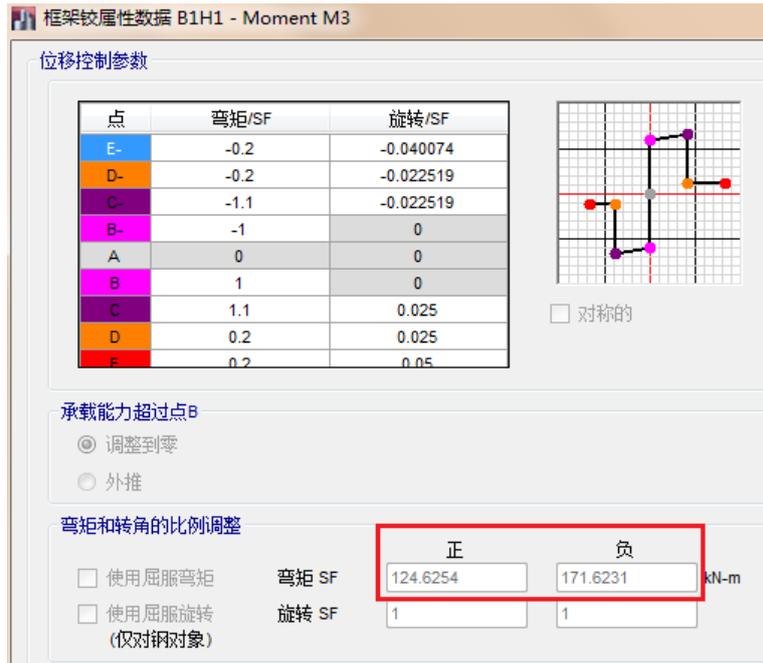


图 55 默认 M3 铰属性

### 3.4 分层壳属性定义

分层壳允许在厚度方向上有任意数量的层，每层都具有独立的位置、厚度及材料，并且材料行为可以是非线性的。与均匀壳不同是，1) 分层壳节点转动自由度（绕面的法线轴转动）未经修正，导致节点转动刚度较小，故分层壳与框架单元连接时需要增加埋设梁。2) 分层壳总是使用包含横向剪切变形效应的厚壳（Mindlin/Reissner）公式。3) 可以考虑混凝土轴力/弯矩与剪力的耦合作用，以及开裂后强度的退化。即选用修正 2D Darwin-Pecknold 钢筋混凝土材料模型。对应的材料行为是 coupled。



图 56 分层壳参数

#### 参数说明：

**层名：**同一截面内层名必须唯一，但同一层名可在不同的截面中使用。这样可以在显示层应力结果时，显示同层名但不同截面的结果。

**距离：**层中心到参考面（一般位于截面中心线）的距离（沿单元正 3 轴计量）。

**厚度：**层厚度。模拟分布钢筋时，用户可用面积等效的方法将其等价为一个薄层。

**建模类型（层类型）：**可选择膜、板、壳等行为。

**积分点数：**材料行为在层厚度方向上的取样点。较多的积分点可以捕捉截面沿厚度方向的非线性行为，但会增加计算量。

**材料：**当前层使用的材料。

**材料角：**材料局部轴与单元局部轴的夹角。用户可用材料角相差为 90 度的两层单轴材料来模拟正交的钢筋网。

**材料 S11、材料 S22、材料 S12：**用来控制沿某个方向的材料行为是线性、非线性或无效。

#### 补充说明：

**层数量：**层数量会显著影响计算量。一般地，对于一个具有双层双向分布钢筋的剪力墙，可以有多种模拟方案。比如：1) 用 5 层来模拟，其中 1 层用来模拟混凝土，另外四层分别模拟不同方向的钢筋。2) 用 3 层来模拟，即在方案 1 的基础上忽略两个水平钢筋层的影响。3) 用 2 层来模拟，即在方案 2 的基础上将两个竖向钢筋层合并为一层。如果简化合理，三种方案得到的结果可能相差不大，但计算量却相差甚远。

**层类型：**对于一个混凝土层，也可以有两种模拟方案：1) 用 1 个“壳”层来模拟。2) 用 2 层模拟，即 1 个“膜”层加 1 个“板”层。后者的优势在于，区分了面内行为和面外行为，可以只考虑面内行为的非线性，让面外行为保持为弹性，从而减小计算量。

**各方向材料行为：**现实的材料在各个方向都可以是非线性的，即 S11、S22、S12 都设为非线性最符合现实情况。但结构在可能遭受荷载水平内，并非所有方向的材料都会进入非线性，所以根据工程经验和已有的分析数据，将可以忽略的行为设为无效，将不会出现非线性的行为设为线性，可以有效降低分析规模，提高计算速度，并得到合理的结果。本例也采用这个原则对分层壳的定义进行了简化。

### 3.5 非线性单元布置建议

进行弹塑性时程分析前，首先要确保模型在线性静力工况和模态工况下的响应符合预期。开始时，不要在所有构件上都布置非线性单元，而应该从预期最可能发生非线性的部位开始，逐步添加非线性单元。从相对简单的模型入手，积累经验，当对模型的力学行为有所把握时，再进一步增加非线性因素，考虑更极端的非线性行为。

#### 塑性铰的布置建议

**铰数量：**避免处处布铰。可根据静力分析的结果辨识结构的关键部位，有针对性的布置塑性铰。否则会花费大量求解时间，并影响收敛性。

**铰类型：**分为力控制和变形控制两种。脆性破坏行为应采用力控制的铰，延性破坏行为应采用变形控制的铰。

**铰属性：**对不同类型的构件，应根据其可能出现的塑形受力状态，指定不同属性的塑性铰。一般地，框架柱压弯为主，一般需使用纤维 P-M2-M3 铰；框架梁受弯为主，一般指定 M3 铰；连梁可能出现剪切或弯曲破坏，一般指定 M3 铰或 V2 铰。

**铰位置：**应根据构件的受力状态，在构件受力较大且有可能出现塑性的位置进行指定。

## 分层壳的布置建议

分层壳的非线性行为数量会显著影响计算速度和收敛性，所以合理简化墙体的分层壳模型是必要的。一般在墙肢受力较大的部位（通常是底部）布置分层壳，其余墙肢仍使用弹性壳。既使在同一片墙肢中，也可根据受力状态，在边缘构件区域使用分层壳，中间区域使用弹性壳。总之，控制分层壳单元的数量有助于提高分析效率。

本例中，连梁使用了框架单元+塑形铰的方式来模拟，这种方式简单易行，且计算收敛性好。但当连梁跨高比较小、且位于关键部位，需要了解其应力发展过程时，建议使用分层壳来模拟其弹塑性行为。

## 3.6 时间积分方法

HHT 方法为程序推荐的时间积分方法。其中算法阻尼  $\alpha$  取值范围为  $0 \sim -1/3$ 。当  $\alpha=0$  时，HHT 方法退化为平均加速度法，当  $\alpha=-1/3$  时，HHT 方法会过滤掉周期  $T < 10\Delta t$  ( $\Delta t$  为分析步长) 的结构响应，因此  $\alpha$  取值与分析步长以及结构周期都有一些关系。一般来讲，推荐  $\alpha$  取值为  $-1/48$  或  $-1/24$  (分析步长较大时取较大值)，不会带来较大的误差，并能够显著的提高分析效率。但应注意的是，由于算法阻尼的引入，会导致结构出现能量误差，当能量误差较大时，应提高  $\alpha$  值。

## 3.7 非线性参数说明

如图 38 所示，非线性分析是通过若干步进行的。当步数达到**最大总步数**时，程序将终止分析。

- ◆ 迭代分析的**时间步长**是由时程工况定义决定的，当当前时间步长无法得到收敛结果时，程序会自动减小时间步长再次进行分析，若时间步长小于  $10^{-9}$  时，程序将会终止分析，并给出响应警告。

每一步的平衡都是通过迭代来实现的。当求解的误差小于**迭代收敛容差**时，则结束本步并进入下一步的迭代。迭代的方法有 **Constant-Stiffness** 法和 **Newton-Raphson** 法。

- ◆ **Constant-Stiffness** 法的求解速度较快；**Newton-Raphson** 迭代法求解效率较高。
- ◆ 将任何一种迭代法的**最大迭代次数**设为 0，则不使用该迭代法；
- ◆ 将两种迭代法的**最大迭代次数**都设为 0，则由程序来决定迭代次数。
- ◆ 一般情况下，采用默认设置即可。

某个塑性铰屈服（到达 B 点）、达到极限承载力（C 点）、达到残余强度（D 点）都称为出现一个事件。每出现一个事件，程序就会更新结构的刚度矩阵，进而花费一定的计算。

- ◆ 事件到事件控制（**事件到事件步**）在 ETABS2016 版本中适用于塑性铰、纤维铰、墙铰以及分层壳等非线性单元。
- ◆ 程序允许设置一个**事件凝聚容差**，即当某个塑性铰进入事件时，程序认为状态跟其很接近（小于设置的事件凝聚容差）的其它铰也一同进入这一事件。这样可以减少出现的事件数，从而减少刚度更新的次数，减少求解时间。

出现以下情况之一，称为出现一个**空步**：

- ◆ 某个框架铰开始卸载；
- ◆ 一个事件引发了另一个事件；
- ◆ 某次迭代不收敛，采用更小的步长进行迭代。