

集成化的通用结构分析与设计软件

SAP2000[®]

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 SAP2000 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

说 明

本教程将通过具体的案例，介绍如何应用 SAP2000 处理一些典型问题。“模型概况”是对案例的简单介绍；“主要工作流程”是对常规建模过程的描述；“要点详解”是对相关一些软件应用技术的详细说明。本教程不涉及软件操作的详细讲解，相关内容请参考 SAP2000 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

钢框架 PUSHOVER 分析案例教程

模型概述

如图 1 所示的钢框架，共 4 层，层高 3.6 米，平面尺寸如图 2 所示。楼面恒、活荷载均为 1.5KN/m^2 。抗震设防烈度 8 度，设计基本地震加速度值为 $0.3g$ ，多遇地震水平地震影响系数最大值 0.24 ，特征周期 0.45s ，罕遇地震水平地震影响系数最大值 1.2 ，特征周期 0.5s ，周期折减系数 0.85 ，阻尼比 0.03 。

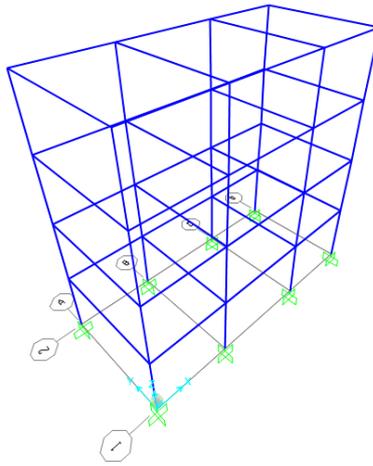


图 1 钢框架三维模型

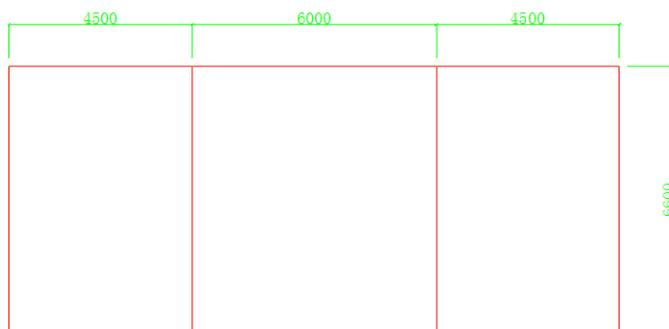


图 2 模型平面图

该结构已完成设计，设计截面如表 1 所示。本案例拟通过静力弹塑性分析了解结构在大震作用下的性能状态。

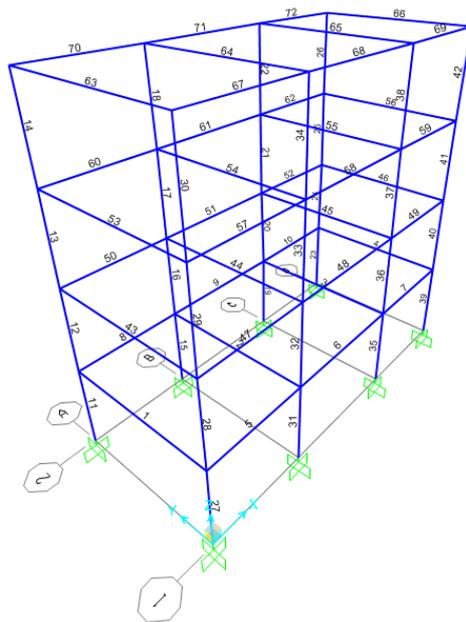


图 3 结构构件编号

表 1 构件截面 (Q235)

构件编号	截面尺寸	构件编号	截面尺寸	构件编号	截面尺寸
1	HN550X200X10X16	25	HW350X350X10X16	49	HN300X150X6.5X9
2	HN550X200X10X16	26	HW350X350X10X16	50	HN300X150X6.5X9
3	HN550X200X10X16	27	HW500X500X20X25	51	HN300X150X6.5X9
4	HN550X200X10X16	28	HW400X400X18X28	52	HN300X150X6.5X9
5	HN400X150X8X13	29	HW350X350X10X16	53	HN500X200X10X16
6	HN400X150X8X13	30	HW350X350X10X16	54	HN500X200X10X16
7	HN400X150X8X13	31	HW500X500X20X25	55	HN500X200X10X16
8	HN400X150X8X13	32	HW400X400X18X28	56	HN500X200X10X16
9	HN400X150X8X13	33	HW350X350X10X16	57	HN250X125X6X9
10	HN400X150X8X13	34	HW350X350X10X16	58	HN250X125X6X9
11	HW500X500X20X25	35	HW500X500X20X25	59	HN250X125X6X9
12	HW400X400X18X28	36	HW400X400X18X28	60	HN250X125X6X9
13	HW350X350X10X16	37	HW350X350X10X16	61	HN250X125X6X9
14	HW350X350X10X16	38	HW350X350X10X16	62	HN250X125X6X9
15	HW500X500X20X25	39	HW500X500X20X25	63	HN400X200X8X13
16	HW400X400X18X28	40	HW400X400X18X28	64	HN400X200X8X13
17	HW350X350X10X16	41	HW350X350X10X16	65	HN400X200X8X13
18	HW350X350X10X16	42	HW350X350X10X16	66	HN400X200X8X13
19	HW500X500X20X25	43	HN550X200X10X16	67	HN250X125X6X9
20	HW400X400X18X28	44	HN550X200X10X16	68	HN250X125X6X9
21	HW350X350X10X16	45	HN550X200X10X16	69	HN250X125X6X9
22	HW350X350X10X16	46	HN550X200X10X16	70	HN250X125X6X9
23	HW500X500X20X25	47	HN300X150X6.5X9	71	HN250X125X6X9
24	HW400X400X18X28	48	HN300X150X6.5X9	72	HN250X125X6X9

操作步骤

1、材料属性修正

由于程序计算塑性铰属性时需要使用有效屈服强度,故需要将默认材料属性中的有效屈服强度修改为 235N/mm^2 , 其具体操作为**定义>材料属性>修改/显示材料**, 在弹出的如下图的对话框中将有效屈服强度修改为 235, 注意单位为 N, mm, C。

材料属性数据	
一般数据	
材料名称和显示颜色	Q235
材料类型	Steel
材料注释	修改/显示注释...
重量和质量	
重量密度	7.700E-05
质量密度	7.850E-09
单位	N, mm, C
各项同性属性数据	
弹性模量, E	210000.
泊松比, U	0.3
线膨胀系数, A	1.170E-05
剪切模量, G	80769.23
钢材材料其他属性	
屈服强度, fyk	235.
极限强度, fuk	390.
有效屈服强度, fye	260.
有效抗拉强度, fue	430.
<input type="checkbox"/> 切换到高级属性显示	
确定 取消	

图 4 材料属性数据对话框

2、广义位移定义

为方便分析后位移结果的统计，可先定义广义位移。在定义广义位移时，可先对结构节点重新编号，后使用交互式数据库编辑功能快速定义所有的广义位移。

2.1 节点重新编号

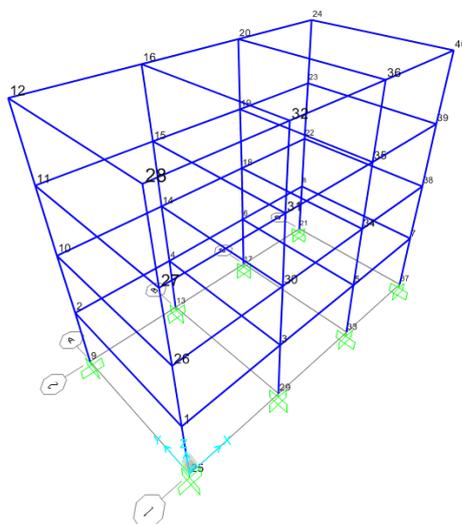


图 5 模型现有的节点编号

点击**编辑>修改标签**，在弹出的如图 6 对话框中的**项类型**选择 **Element Labels-Joint**，即节点单元编号；在**下一号**区域内输入重新编号的起始编号，一般情况下，此数字要大于现有编号的值，避免在编号过程中编号错乱，此例中，共有节点 40 个，可将起始编号定为 **100**。点击**编辑>自动重标签>列表中全部**，点击**确定**，完成重编号工作。重新编号后的节点编号如**错误!未找到引用源。**所示。



图 6 交互式节点编号修改对话框

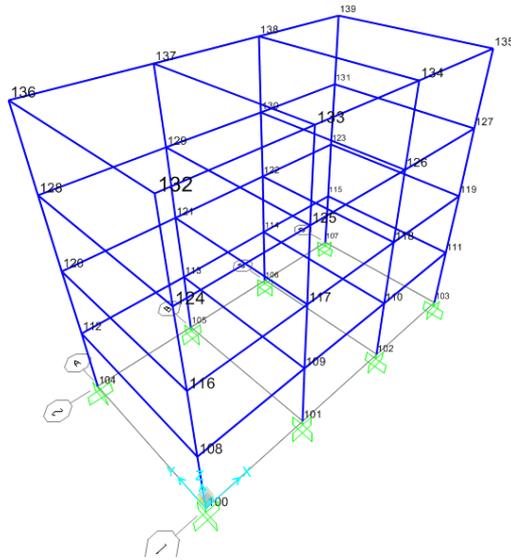


图 7 重编号后的节点编号

2.2 广义位移定义

点击定义>广义位移>添加新广义位移，在广义位移定义对话框中的广义位移名称中输入 *STORY1_1*，类型选择 *平移*，在节点栏输入 *100*，*U1* 栏输入 *-1* 后点击添加，再次在节点栏输入 *108*，*U1* 栏输入 *1*，点击添加，点击确定，完成广义位移 *STORY1_1* 的定义。在分析完成后，程序可直接输出此广义位移的值，此广义位移代表的含义为，节点 108 和节点 100 在 *U1* 方向的位移差（在默认情况下，节点的 *U1* 方向即为系统的 *X* 方向）。

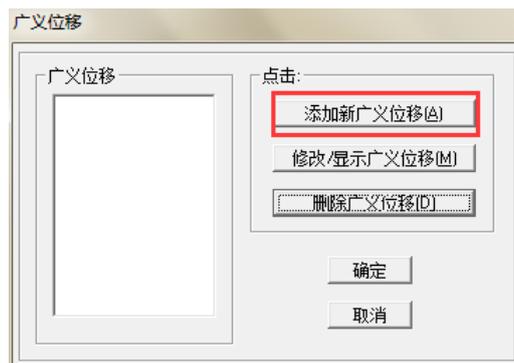


图 8 定义广义位移



图 9 广义位移定义对话框

为快速定义所有的广义位移，下面将使用交互式数据库编辑功能定义广义位移。点击**编辑>交互式数据库编辑**，在弹出的对话框中选择**广义位移>Table: Generalized Displacement Defintions1-Translational**，点击**确定**。在弹出的对话框中点击**到 EXCEL** 按钮，则弹出 EXCEL 数据，根据 EXCEL 中定义广义位移的格式，填写剩余所有的广义位移如图 12 所示，填写完成后，点击图 13 对话框中的**从 EXCEL** 按钮，程序将会把 EXCEL 中的数据导入到程序中，再点击图 14 中的**应用到模型**按钮，点击**确定**按钮，至此，所用的广义位移定义完成。可在**定义>广义位移**中查看广义位移的细节。

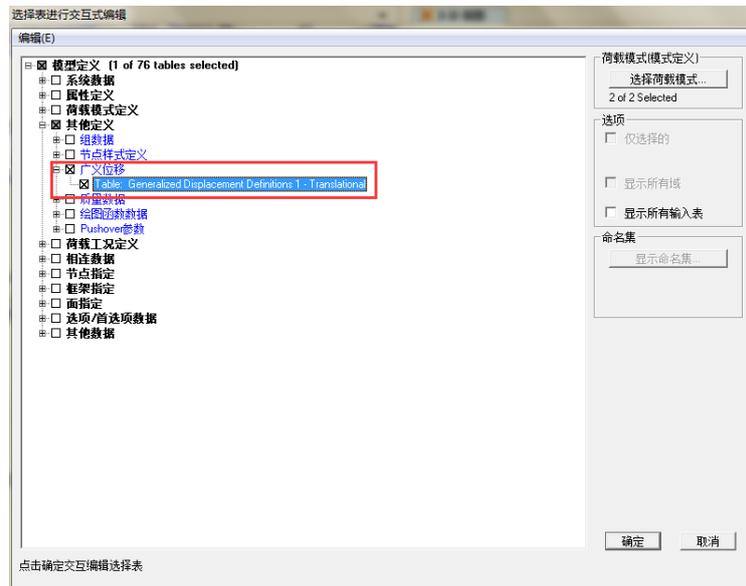


图 10 交互式数据库编辑对话框

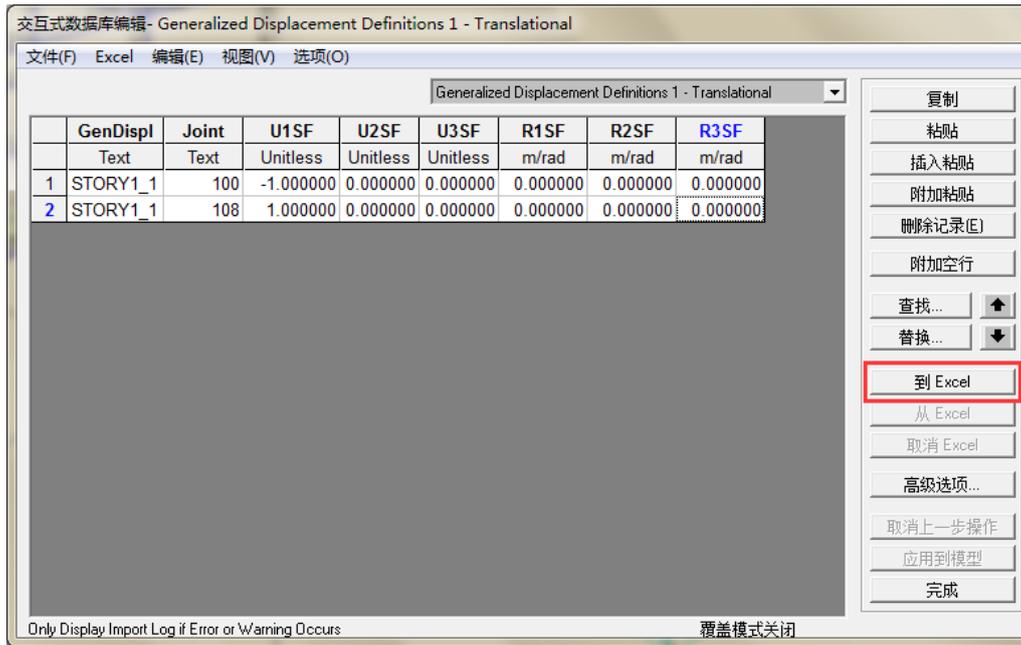


图 11 交互式数据库编辑对话框

A	B	C	D	E	F	G	H
TABLE: Generalized Displacement Definitions 1 - Translational							
GenDispl	Joint	U1SF	U2SF	U3SF	R1SF	R2SF	R3SF
Text	Text	Unitless	Unitless	Unitless	m/rad	m/rad	m/rad
STORY3_6	121	-1	0	0	0	0	0
STORY3_6	129	1	0	0	0	0	0
STORY3_7	122	-1	0	0	0	0	0
STORY3_7	130	1	0	0	0	0	0
STORY3_8	123	-1	0	0	0	0	0
STORY3_8	131	1	0	0	0	0	0
STORY4_1	124	-1	0	0	0	0	0
STORY4_1	132	1	0	0	0	0	0
STORY4_2	125	-1	0	0	0	0	0
STORY4_2	133	1	0	0	0	0	0
STORY4_3	126	-1	0	0	0	0	0
STORY4_3	134	1	0	0	0	0	0
STORY4_4	127	-1	0	0	0	0	0
STORY4_4	135	1	0	0	0	0	0
STORY4_5	128	-1	0	0	0	0	0
STORY4_5	136	1	0	0	0	0	0
STORY4_6	129	-1	0	0	0	0	0
STORY4_6	137	1	0	0	0	0	0
STORY4_7	130	-1	0	0	0	0	0
STORY4_7	138	1	0	0	0	0	0
STORY4_8	131	-1	0	0	0	0	0
STORY4_8	139	1	0	0	0	0	0

图 12 EXCEL 数据

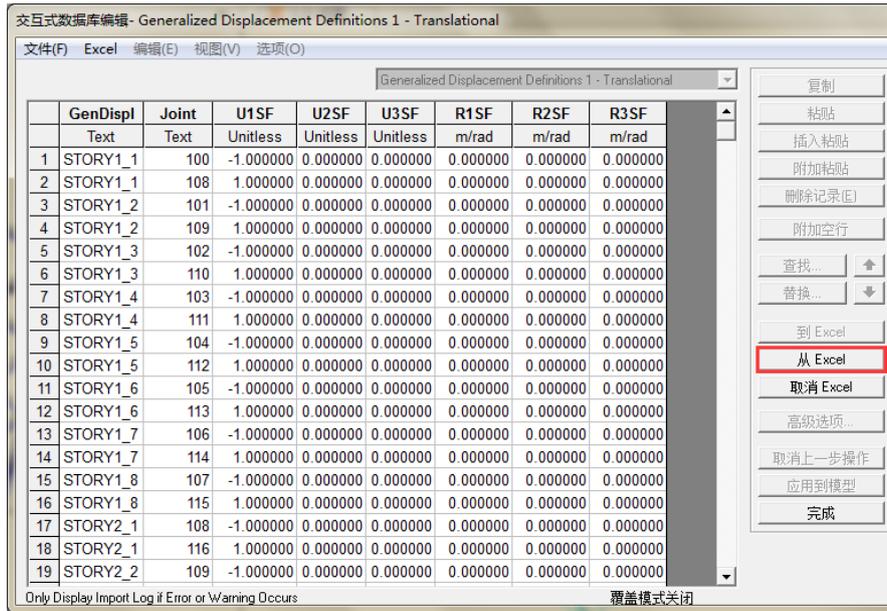


图 13 EXCEL 数据导入

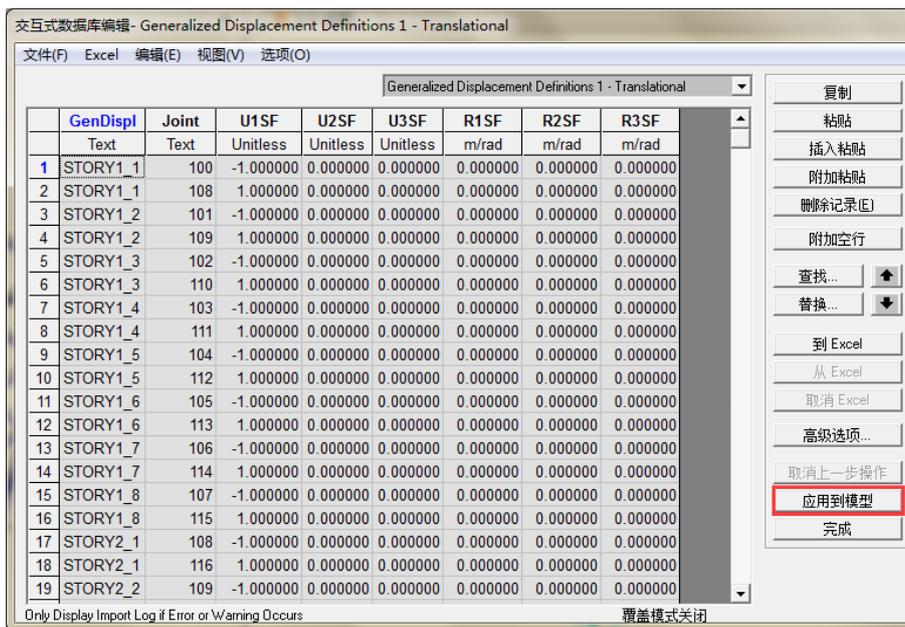


图 14 数据应用到模型

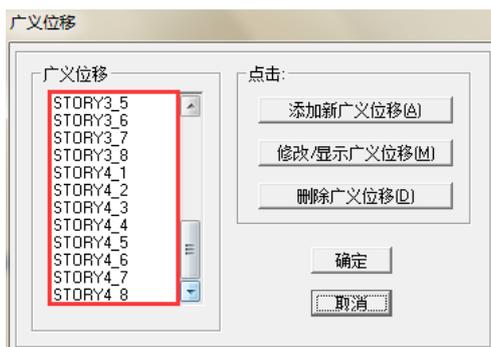


图 15 广义位移对话框

3、不同水准地震反应谱函数定义

在 SAP2000 中的推覆分析中，程序可以使用反应谱函数进行自动转换生成相对应的需求谱。此例拟进行不同水准地震下的推覆分析，在进行分析前，可定义相应的反应谱函数以便于后续需求谱的生成。

在本案例使用中国反应谱函数，对应于抗震设防烈度 8 度，设计基本地震加速度值为 0.3g，多遇地震水平地震影响系数最大值 0.24，特征周期 0.45s，罕遇地震水平地震影响系数最大值 1.2，特征周期 0.5s，周期折减系数 0.85，阻尼比 0.03，定义图 16 的小震反应谱函数和如图 17 的大震反应谱函数。

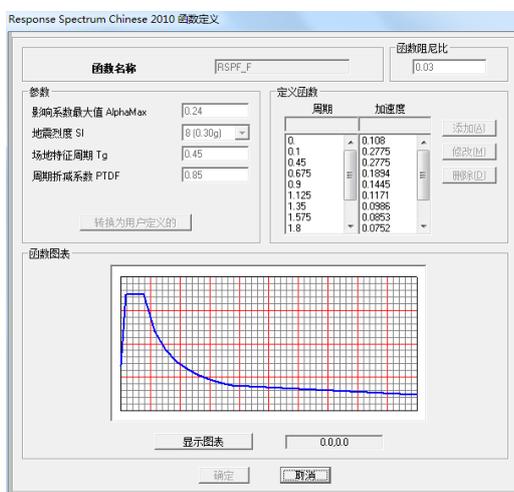


图 16 小震反应谱函数

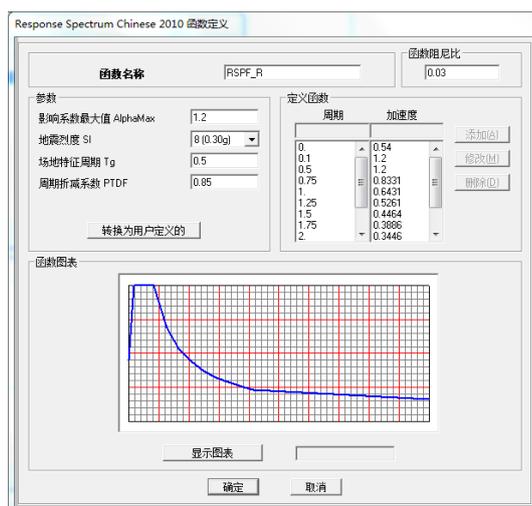


图 17 大震反应谱函数

4、塑性铰指定

框架结构构件的塑性性能在 SAP2000 中可以使用离散的塑性铰来模拟，在分析计算中，所有的塑性变形都发生在塑性铰内。塑性铰根据其力学性能可分为：轴力铰、弯矩铰、剪力铰、PMM 铰等。一般情况下，用户根据结构构件的受力状态指定不同类型的塑性铰，例如，对于框架梁指定弯矩铰，对柱子指定轴力和弯矩耦合的 PMM 铰，对支撑指定轴力铰。

4.1 指定默认塑性铰

通过本操作步为模型中所有的梁构件指定默认的 M 铰，为模型中所有的柱指定默认的 PMM 铰，用于后续的静力推覆分析。

4.1.1 钢梁默认 M 铰指定

选择所有的梁对象，指定>框架>铰，在弹出的如图 18 所示的框架铰指定对话框中的相对距离栏输入 0.1，点击添加。



图 18 框架铰指定对话框

相对距离是指沿着构件的轴向方向，与起始端“i”的相对距离，即“i”端到铰的距离除以框架的全长。一般情况下，可通过构造等其它措施避免塑性铰出现在梁柱的重叠区，故将塑性铰布置在梁柱重叠区外容易发生塑性变形的位罝，此位罝可根据梁柱的截面大小计算得到。在本例中，为计算的简化及指定的便利，将相对距离定为 0.1，在实际工程中，工程师可根据构件的截面尺寸计算塑性铰的实际位罝。另外，一旦在程序中为构件指定了端部偏移，则程序会自动扣除梁柱的重叠区域重新计算铰的实际布置位罝。

在弹出图 19 所示的 *自动框架铰指定数据* 对话框中，自动铰类型选择 *From Table In FEMA 356*，在选择 FEMA356 表中选择 *Table 5-6 (Steel Beam-Flexure)*，分量类型选择 **主要的**，自由度选择 **M3**，变形控制铰承载力选择 **E 点后降荷载**，点击 **确定**。此时，对所有被选择的构件，均已经指定了一个距离起始端相对距离 0.1 的弯矩铰。



图 19 自动弯矩铰指定数据对话框

用同样的方法，为所有的梁对象指定距离起始端相对距离 0.9 的弯矩铰。点击图 18 对话框中的 **确定** 按钮，完成对钢梁弯矩铰的指定。

4.1.2 钢柱默认 PMM 指定

选择所有的柱对象，指定>框架>铰，在弹出的如图 18 所示的 *框架铰指定* 对话框中的 **相**

对距离栏输入 0.1 ，点击**添加**。在弹出的**自动框架铰指定数据**对话框中，自动铰类型选择 **From Table In FEMA 356**，在选择 FEMA356 表中选择 **Table 5-6 (Steel Columns-Flexure)**，分量类型选择**主要的**，自由度选择 **P-M2-M3**，变形控制铰承载力选择 **E 点后降荷载**，如图 20 所示，点击**确定**。此时，对所有的钢柱，均已经指定了一个距离起始端相对距离 0.1 的 P-M-M 铰。

用同样的方法，为所有的柱对象指定距离起始端相对距离 0.9 的 P-M-M 铰。点击图 18 对话框中的**确定**按钮。



图 20 自动 P-M-M 铰指定数据对话框

至此，所有的梁柱默认铰已布置完成，结构完成布置铰以后如图 21 所示。

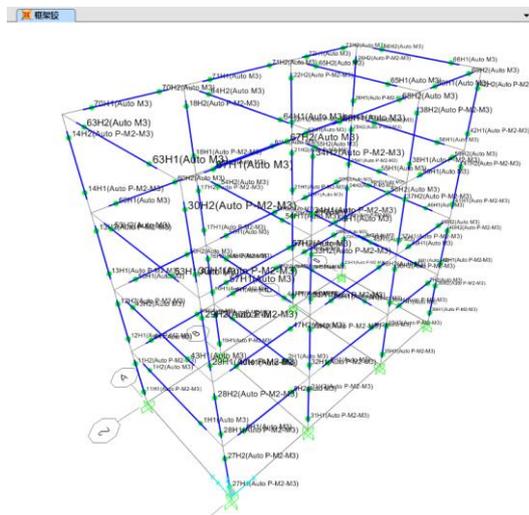


图 21 塑性铰布置图

4.2 默认铰属性查看

对于已指定的默认塑性铰，其属性可通过本小节的操作进行查看。

点击**定义>截面属性>铰属性**，在弹出的**定义框架铰属性**对话框中，勾选“显示生成的属性”选项，得到如图 22 所示的对话框，左侧“全部铰属性”区域中可显示出生成的铰。选择要查看的塑性铰，点击**修改/显示属性**按钮，弹出如图 23 **框架铰属性数据**对话框，在此对话框中可以看到此铰的类型（根据所选择的铰不同，显示铰不同的类型），点击**修改/显示铰属性**，可以查看到此铰的详细属性数据。

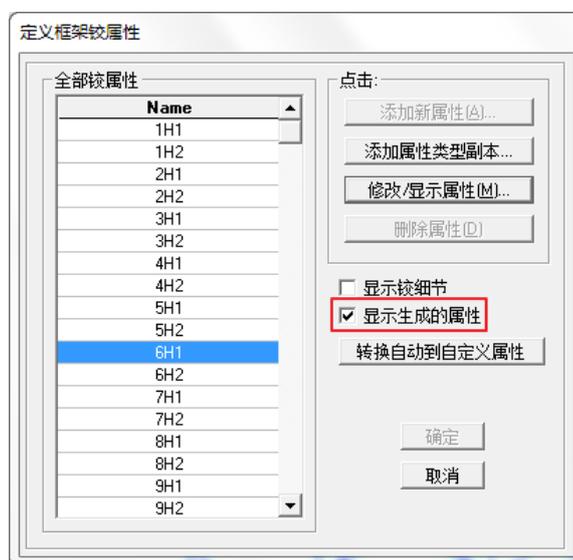


图 22 定义框架铰属性对话框



图 23 框架铰属性数据

2.2.1 钢构件 M 铰属性查看

以弯矩铰 6H1 为例，查看钢构件 M 铰属性。

在如图 22 定义框架铰属性中选择铰 6H1，点击**修改/显示属性**按钮，在弹出的如图 23 对话框中可看到此铰的类型为变形控制 Moment M3 铰，点击**修改/显示铰属性**，弹出如图 24 **框架铰属性数据 6H1-Moment M3**对话框，此对话框中的数据描述了此弯矩铰的属性。

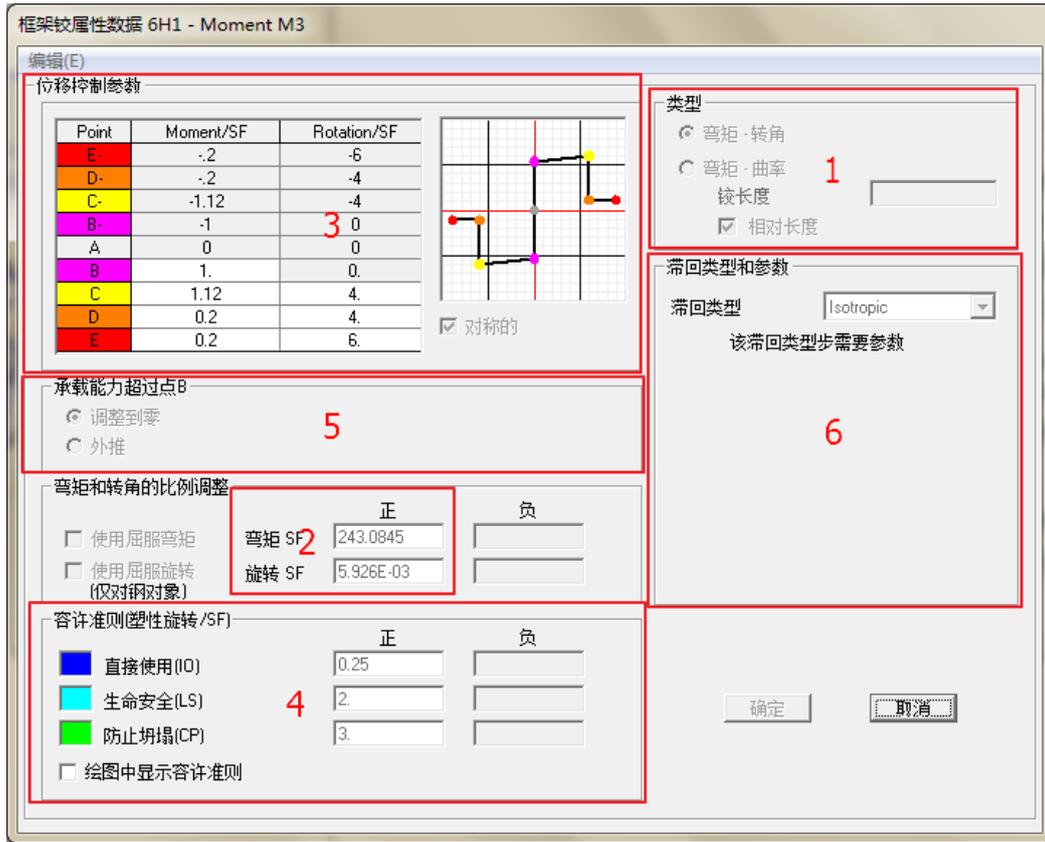


图 24 框架铰属性数据 6H1-Moment M3

区域 1 定义了铰骨架曲线的类型，分为弯矩-转角和弯矩-曲率两种。在此例中，程序默认使用了弯矩-转角类型。

区域 2 中的弯矩和转角/曲率比例调整值即为屈服弯矩和屈服转角/曲率。

区域 3 位移控制参数，定义了塑性铰的骨架曲线，其弯矩、转角/曲率区域所表示的数据分别是弯矩与屈服弯矩的比例、转角/曲率与屈服转角/屈服曲率的比例。

区域 4 中定义了塑性铰的容许准则，其输入的数值也是相对于转角/曲率的相对值。

区域 5 定义了塑性铰的变形超过 E 点后的承载力。

区域 6 定义了塑性铰的滞回类型。

2.2.2 钢构件 PMM 铰属性查看

以弯矩铰 32H1 为例，查看钢构件 PMM 铰属性。

在图 25 定义框架铰属性中选择铰 32H1，点击修改/显示属性按钮，在弹出如图 26 的对话框中可看到此铰的类型为变形控制 Interacting P-M2-M3 铰，即 PMM 铰，点击修改/显示铰属性，弹出如图 27 框架铰属性数据 32H1-Interacting P-M2-M3 对话框，此对话框中的数据描述了 PMM 铰的属性。



图 25 定义框架铰属性对话框



图 26 框架铰属性数据

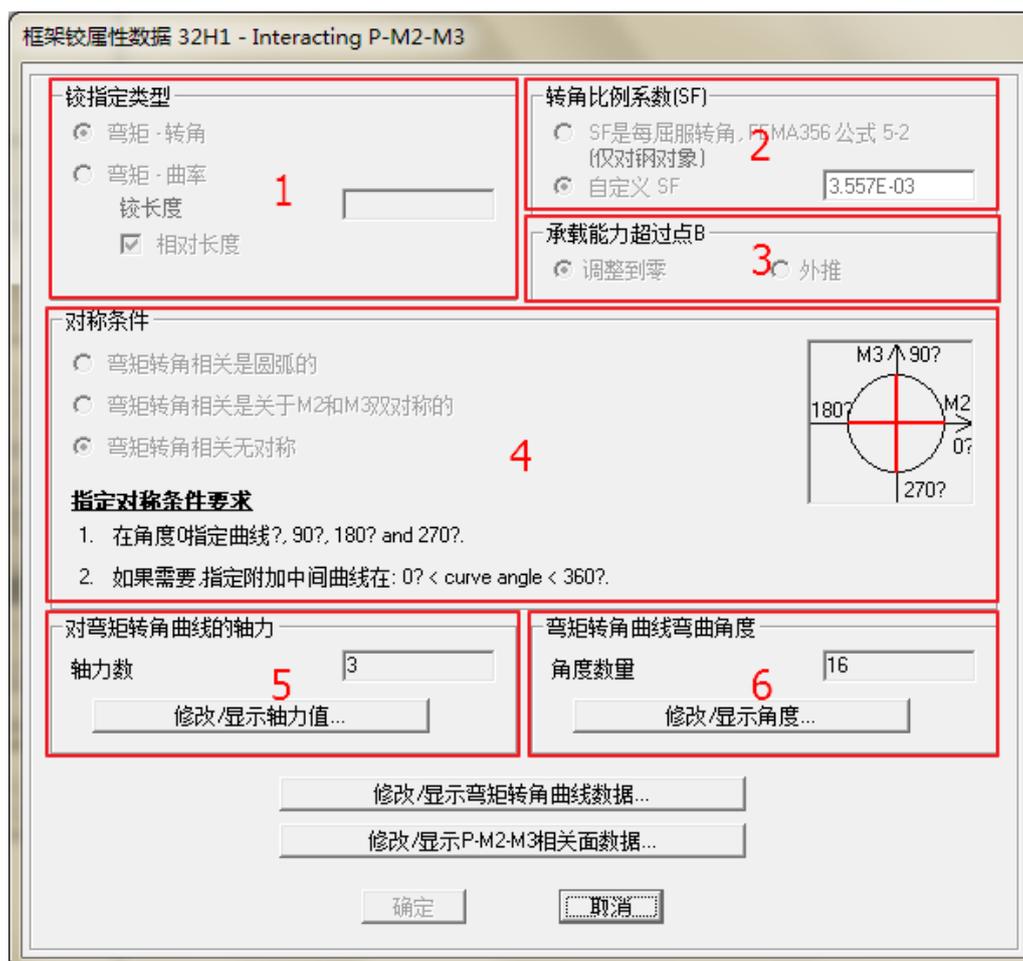


图 27 框架铰属性数据 32H1-Interacting P-M2-M3

区域 1 定义了铰骨架曲线的类型，分为弯矩-转角和弯矩-曲率两种。在此例中，程序默认使用了弯矩-转角类型。

区域 2 中的转角/曲率比例调整值即为对应于轴力为 0 时的屈服转角/曲率。

区域 3 定义了塑性铰的变形超过 E 点后的承载力。

区域 4 对称条件则定义了构件的对称性，右侧图形显示了构件局部方向与 PMM 相关面角度之间的关系，从图中可以看出，构件强抗弯 M3 方向对应于 PMM 相关面的 90 度方向。

区域 5 中定义确定弯矩-转角/曲率骨架曲线所对应的轴力的数量，在本例中，采用了 3 个轴力来分别确定构件在不同轴向荷载作用下的骨架曲线。

区域 6 定义确定弯矩-转角/曲率骨架曲线的角度数量，此例中的默认值为 16，即在一定的轴向荷载水准下，每 22.5 度定义一条骨架曲线。

点击图 27 对话框中的**修改/显示 P-M2-M3 相关面数据**按钮，弹出如图 28 所示的**铰相关面 32H1-Interacting P-M2-M3**对话框，**交互面选项**给出了程序在计算相关面时的 5 种方法，对于默认的 PMM 铰，其默认选项为**用户定义**，即程序自动计算并输入相关面的数据。在默

SAP2000 案例教程：钢框架 PUSHOVER 分析

认的情况下，轴向荷载-位移关系为理想弹塑性。点击定义/显示用户相关面，弹出图 29 PMM 相关面定义对话框。



图 28 铰相关面 32H1-Interacting P-M2-M3 对话框

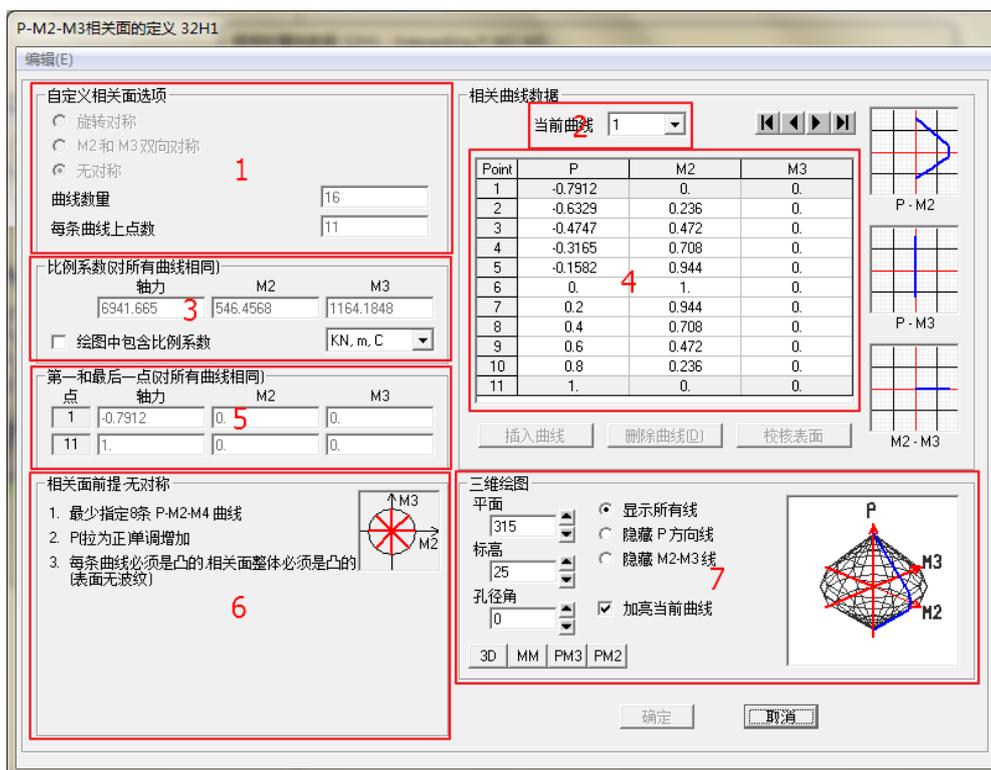


图 29 P-M2-M3 相关面的定义 32H1

区域 1 自定义相关面选项定义了相关面的对称关系及曲线数量和每条曲线上点的数量；

区域 2 可选择所定义的某一条曲线；

区域 3 比例系数确定相关面的最大轴力和强弱轴的最大弯矩；

区域 4 中则显示所选当前曲线上每一个点所对应的轴力和弯矩值，此值以比例形式给出，即与 3 区域内轴力和弯矩的比值；

区域 5 显示了相关面上第一点和最后一点（即所有曲线交点）的相对坐标值；

区域 6 给出了相关面的前提条件；

区域 7 为相关面的视图控制，可调整相关面的显示方式。

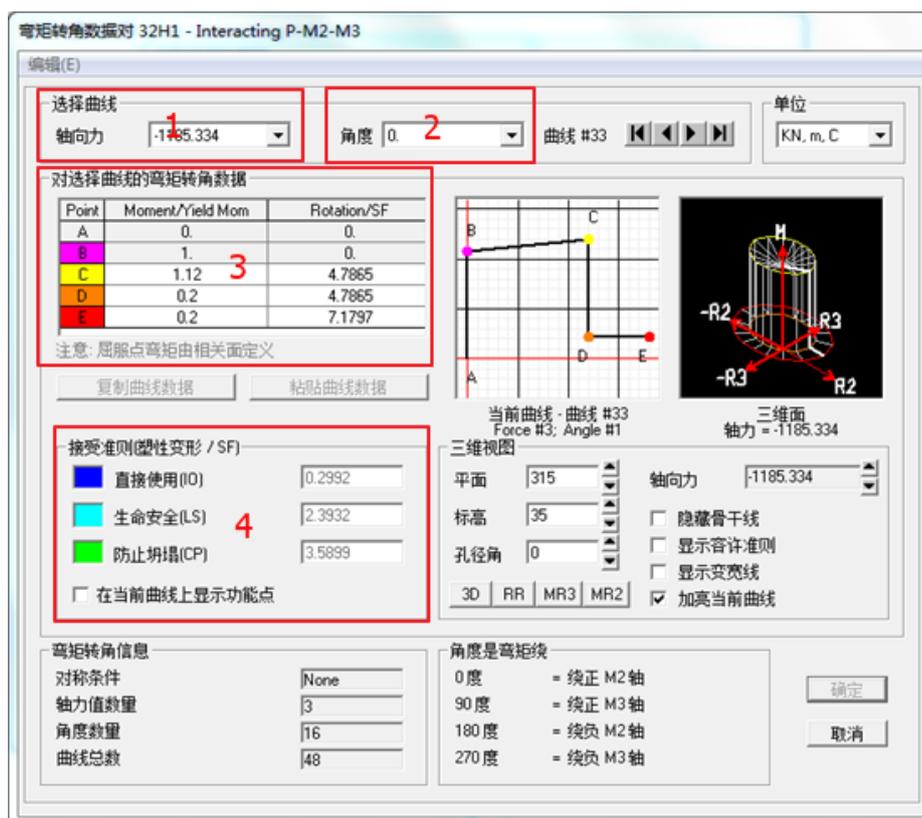


图 30 弯矩转角数据对 32H1-Interacting P-M2-M3 对话框

点击图 28 框架铰属性数据32H1-Interacting P-M2-M3 对话框中的修改/显示弯矩转角曲线数据按钮，弹出图 30 弯矩转角数据对 32H1-Interacting P-M2-M3 对话框。

区域 1 可选择不同的轴向荷载水准；

区域 2 选择相应轴向荷载下骨架曲线的角度；

区域 3 则定义了弯矩转角/曲率的骨架曲线，以比例关系给出，注意转角比例是相对应于轴力为 0 时的转角；

区域 4 定义了接受准则。

5、静力非线性工况定义

为了模拟建筑物承受地震荷载时的真实受力状况，需要在施加 Pushover 工况前定义结构在承受地震作用时同时承受的竖向荷载，且需要将此工况分析结束时的刚度当作 Pushover 工况的初始刚度。一般情况下，可取重力荷载代表值作为竖向荷载。

5.1 竖向荷载非线性工况定义

首先定义竖向荷载非线性工况，该工况是后续 Pushover 工况的初始条件。点击定义>荷载工况，在弹出的定义荷载工况对话框中点击添加新荷载工况按钮，在弹出的如图 31 所示的荷载工况数据对话框中，输入荷载工况名称为 **GRAV**，分析类型选择 **非线性**，使用的刚度选择 **零初始条件—无应力状态**，几何非线性参数选择 **无**，在施加的荷载区域，荷载类型选择 **Load Pattern**，施加 **1 倍的恒荷载和 0.5 倍的活荷载**，点击确定按钮。



图 31 竖向荷载工况定义对话框

5.2 Pushover 工况初始条件定义

再次添加新荷载工况，荷载工况名称输入 **Push_X**，分析类型选择 **非线性**，使用的刚度选择 **从上次非线性工况终点状态继续**，在下拉列表中选择 **GRAV**，此时，在进行 Pushover 工况分析时，所用到的初始刚度为所选竖向非线性工况分析结束时的刚度，分析中所用到的荷载包含上一次分析中的荷载，如图 32 所示。



图 32 Pushover 工况定义对话框

5.3 Pushover 工况加载模式

在施加的荷载区域，**荷载类型**选择 *Mode*，荷载名称选择 *1*，比例系数输入 *1*，如图 32 所示。

当**荷载类型**选择 *Mode* 时，即为模态方式施加荷载，施加荷载的分布与所选得结构模态相关；**荷载名称**则指定了所施加的荷载为模态分析的第几阶模态，在本例中选择 1 则为施加与模态 1 分布相同的荷载；比例系数是对所施加荷载的调幅。

5.4 Pushover 工况荷载施加控制

在图 32 对话框中的**其它参数**区域，**施加荷载**栏点击**修改/显示**按钮，弹出图 33 *非线性静力分析荷载施加控制*对话框。此对话框定义了非线性分析中，荷载施加的控制方式。

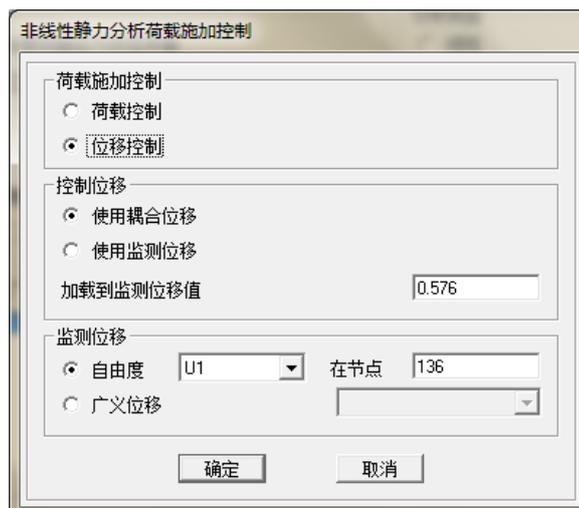


图 33 非线性静力分析荷载施加控制对话框

在 Pushover 分析中，所施加的荷载是按照比例逐渐增加给结构的，在分析的初始状态下，施加荷载的比例系数为零，随着 Pushover 分析的逐步进行，直至达到指定 Pushover 结尾或者结构不能够再承受更大的荷载。控制 Pushover 分析中施加在结构上的荷载有两种方法：荷载控制和位移控制。

一般情况下，对于已知大小的荷载，当确定结构能够承受此荷载时，可使用**荷载控制**。使用荷载控制时，程序根据非线性静力分析保存结果中的参数，将荷载分成多步逐级施加到结构中，直至结构因材料屈服或失效，或因几何不稳定而不能再承受荷载时，Pushover 分析停止。

当施加的荷载未知或期望结构失稳时，推荐使用**位移控制**。位移控制时，程序将施加荷载直至监测点的位移达到预先指定的位移，此时，程序会先计算需产生此位移增量的力增量，并将此力增量施加到结构上。在施加此荷载增量的过程中，结构可能发生结构的屈服或失效，程序会进行试算和迭代来找到产生期望位移增量时的荷载。使用位移控制，更容易捕捉到监测随荷载变化而产生的变化，特别是邻近屈服点时监测点位移变化的过程。

由于在进行推覆前，对施加到结构上的水平荷载未知，故本例在荷载施加控制栏选择**位移控制**。

耦合位移是结构中所有位移自由度的加权总和，即每个位移分量乘以在该自由度上施加的荷载并求和，也可看作是所施加在每个节点上的荷载所做的功。**监测位移**则指监测点在指定位移分量上的位移值。

监测位移区域定义监测点及其自由度的位移分量。一般情况下，监测点选择时，尽量选择对荷载敏感的节点，默认的监测点则选择为结构 Z 向标高最大的节点。监测位移的**自由度**方向应选择与施加荷载的方向相一致，如施加了 X 方向的地震荷载，则应该选择监测的自由度为 U1（1、2、3 为节点的局部坐标方向，在默认情况下，节点的局部坐标方向与整体 X、Y、Z 方向相一致）。程序给出的“**加载到监测位移值**”的默认值为结构高度的 0.04 倍，此数值可以进行修改。

在本例中，使用**监测位移**，当选此项时，程序给出了默认的监测点 136，其在模型中的位置如图 34 所示，在结构的最高处，自由度选择默认的 U1，即为施加地震荷载的 X 方向，加载到监测位移点值在默认情况下为 0.576m，为结构总高 14.4m 的 0.04 倍。

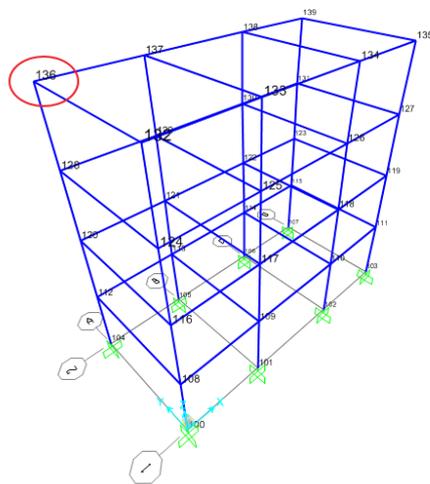


图 34 监测点位置

5.5 Pushover 工况结果保存

在图 32 对话框中的**其它参数**区域，**结果保存**栏点击**修改/显示**按钮，弹出**非线性静力工况结果保存**对话框，如图 35 所示。在此对话框中，可选择**仅保存最终状态**或者**保存多个状态**。当选择保存为多个状态时，可控制保存状态的最小数量和最大数量，此最小数量和最大数量的数值，将影响 Pushover 分析的加载步数，例如，最小数量为 10 时，程序会将监测位移值分为等值的 10 份，每一个加载步，程序试图找到监测位移增加 0.1 倍监测位移的荷载。

为得到 Pushover 分析过程中的相关结果，本案例在结果保存栏选择**多个状态**，每个阶段保存状态的最小数量和保存状态的最大数量按照默认的 10 和 100，点击**确定**。如果勾选“仅保存正位移增量”，则程序不保存位移增量为负时的分析结果。

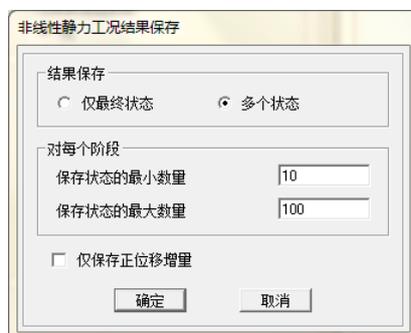


图 35 非线性静力工况结果保存对话框

SAP2000 案例教程：钢框架 PUSHOVER 分析

点击图 32 中的**确定**按钮，至此，已定义了 X 方向的 Pushover 分析工况。

6、运行分析

点击**分析>设置分析选项**，在弹出的对话框中勾选全部有效自由度如图 36 所示，点击**确定**。



图 36 分析选项设置

点击**分析>运行分析**，在弹出的对话框中选择运行的工况如图 37 所示，点击**运行分析**，程序开始运行分析。

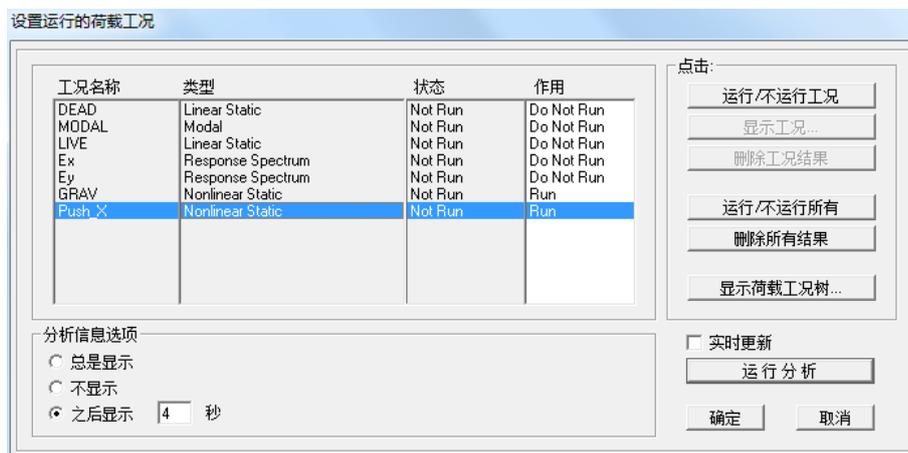


图 37 运行的荷载工况

7、结果查看

运行分析后，可查看相关的分析结果。

7.1 竖向荷载下的变形

查看竖向荷载下结构的变形，检验结构是否出现塑性铰而进入到塑性区。点击**显示>显示变形**，选择工况 **GRAV**，查看在竖向荷载作用下的变形，如图 38 所示。注意，在此工况下，结构不能有铰出现。

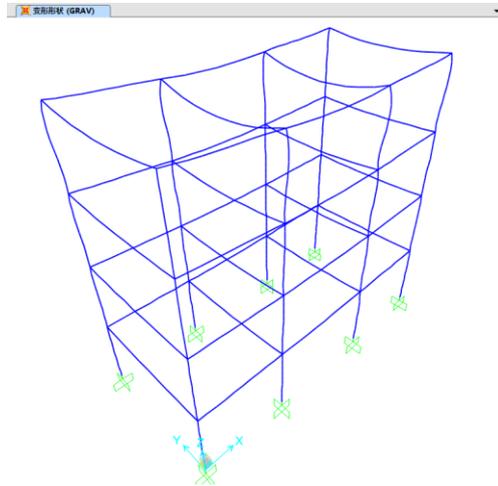


图 38 竖向荷载作用下的变形

7.2 底部剪力-监测位移曲线

点击菜单**显示>显示静力 Pushover 曲线**，弹出图 39 所示的 *Pushover 曲线* 对话框。

在 1 区域列出了已完成运行的静力非线性工况，选择要查看的工况 **Push_X**。

区域 2 出图类型列出了不同的图形显示选项，包含底部剪力-监测位移曲线、ATC-40 能力谱、FEMA356 目标位移、FEMA440 等效线性化、FEMA440 位移修正。在此区域选择 **Resultant Base Shear vs Monitored Displacement**，此时图形显示区域得到结构底部剪力与分析工况中设置的监测点的监测位移之间的关系，水平轴表示位移，竖向轴表示底部剪力。

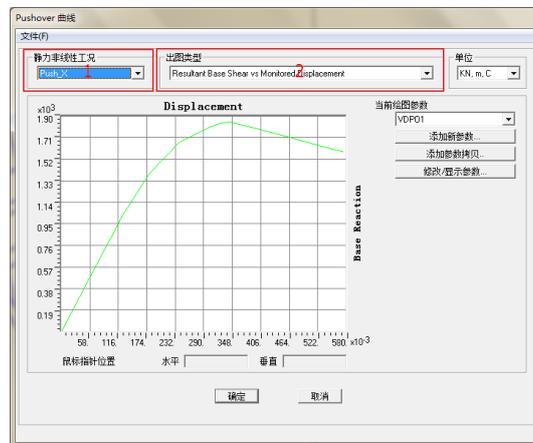


图 39 底部剪力—监测位移曲线

7.3 ATC-40 能力谱

在得到结构底部剪力和监测位移关系后，可采用不同的求解方法求解性能点，以性能点处的结构受力状态进行结构性能评估。在本小节中，采用 ATC-40 能力谱方法求解性能点。

在图 39 所示的 Pushover 曲线对话框中，将出图类型选择为 **ATC-40 Capacity Spectrum**，图中显示谱加速度—谱位移曲线，如图 40 所示。

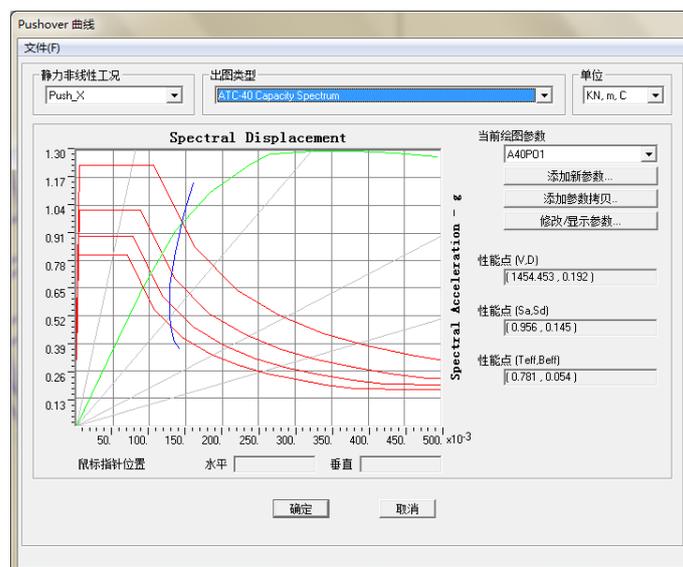


图 40 谱加速度—谱位移曲线

图形区域中绿色曲线为能力曲线、红色曲线为不同阻尼比下的需求谱族，蓝色曲线为可变阻尼的单一需求谱，蓝色曲线和绿色曲线的交点为结构的性能点，同时，结构的性能点显示在对话框的右侧，用三种不同的方法进行表示。

点击图 40 所示的 Pushover 曲线对话框中的**修改/显示参数**按钮，弹出图 41 所示的 **ATC-40 能力谱参数**对话框。



图 41 ATC-40 能力谱参数对话框

将单位选择为 **KN,m,C**。绘图轴选择 Sa-Sd，在需求谱定义区域，选择**函数**，并在下拉列表中选择定义好的大震反应谱函数 **RSPF_R**，系数 SF 输入 **9.806**。阻尼参数定义区域，固有+附加阻尼输入 **0.03**，结构性能类型选择 **B**。点击**更新绘图**按钮，点击**确定**。在更新的 *Pushover 曲线*对话框中，可看到其性能点 (Teff, Beff) = (0.781, 0.054)。

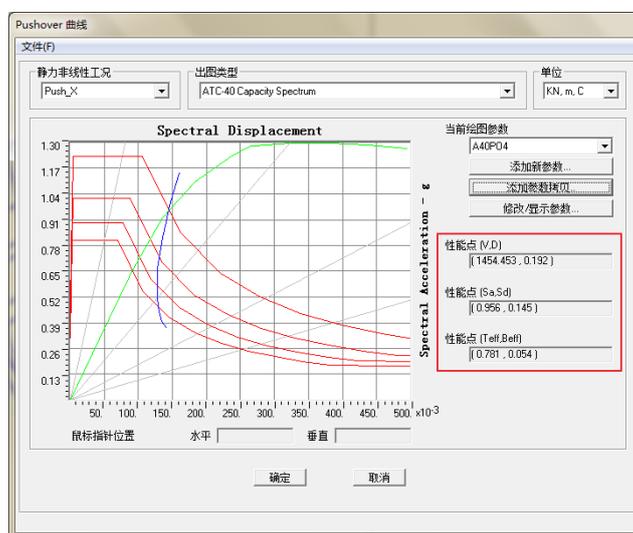


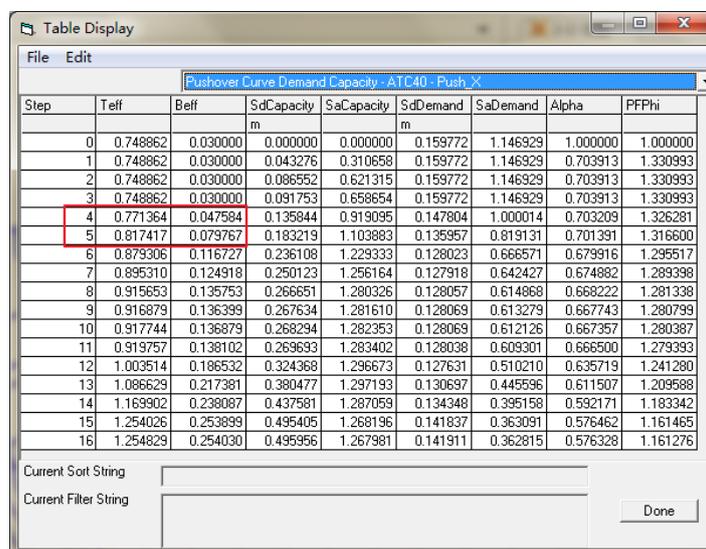
图 42 更新的 Pushover 曲线对话框

7.4 性能点时较的分布状况

可通过该小节查看性能点处结构出较的状态。

SAP2000 案例教程：钢框架 PUSHOVER 分析

点击图 42 中的文件>显示表格，弹出如图 43 所示的表格数据，在此表格中可以查看到，性能点发生在分析的第 4 步和第 5 步之间。点击 **Done** 关闭图 43 对话框，点击 **确定** 关闭图 42 对话框。



Step	Teff	Beff	SdCapacity	SaCapacity	SdDemand	SaDemand	Alpha	PFFPhi
0	0.748862	0.030000	0.000000	0.000000	0.159772	1.146329	1.000000	1.000000
1	0.748862	0.030000	0.043276	0.310658	0.159772	1.146329	0.703913	1.330993
2	0.748862	0.030000	0.086552	0.621315	0.159772	1.146329	0.703913	1.330993
3	0.748862	0.030000	0.091753	0.658654	0.159772	1.146329	0.703913	1.330993
4	0.771364	0.047584	0.135844	0.919095	0.147804	1.000014	0.703209	1.326281
5	0.817417	0.079767	0.183219	1.103883	0.135957	0.819131	0.701391	1.316600
6	0.879306	0.116727	0.236108	1.229333	0.128023	0.666571	0.679916	1.295517
7	0.895310	0.124918	0.250123	1.256164	0.127918	0.642427	0.674882	1.289398
8	0.915653	0.135753	0.266651	1.280326	0.128057	0.614868	0.668222	1.281338
9	0.916879	0.136399	0.267634	1.281610	0.128069	0.613279	0.667743	1.280799
10	0.917744	0.136879	0.268294	1.282353	0.128069	0.612126	0.667357	1.280387
11	0.919757	0.138102	0.269693	1.283402	0.128038	0.609301	0.666500	1.279393
12	1.003514	0.186532	0.324368	1.296673	0.127631	0.510210	0.635719	1.241280
13	1.086629	0.217381	0.380477	1.297193	0.130697	0.445596	0.611507	1.209588
14	1.169902	0.238087	0.437581	1.287059	0.134348	0.395158	0.592171	1.183342
15	1.254026	0.253899	0.495405	1.268196	0.141837	0.363091	0.576462	1.161465
16	1.254829	0.254030	0.495356	1.267981	0.141911	0.362815	0.576328	1.161276

图 43 分析数据表格显示

点击显示>显示变形，在弹出的如图 44 所示的变形后形状对话框中，将工况/组合名选择为 **Push_X**，多值选项中选择步，并输入 **4**，点击 **确定**。激活的窗口显示在 Pushover 工况中第 4 步时结构的出铰状况如图 45 所示，将变形转换到第 5 步，得到如图 46 所示的出铰状况。在性能点处，结构的出铰状况处于第 4 步和第 5 步之间。

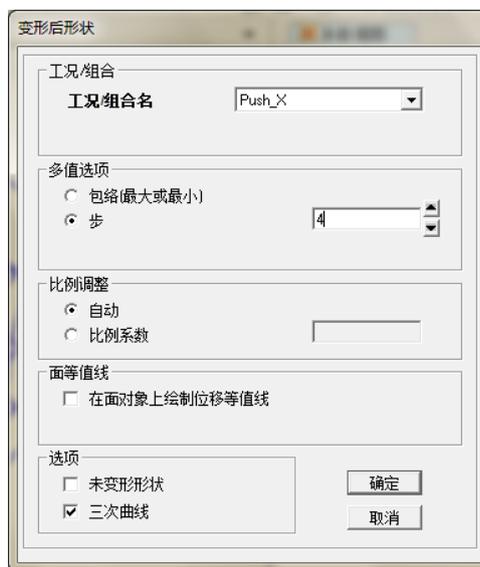


图 44 变形后形状对话框

变形形状 (Push_X) - 步 4:

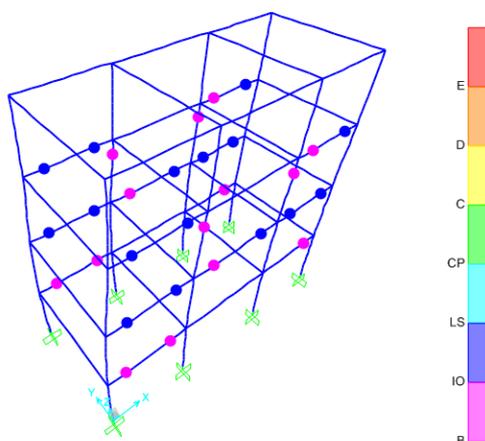


图 45 Pushover 工况第 4 步出铰状况

变形形状 (Push_X) - 步 5:

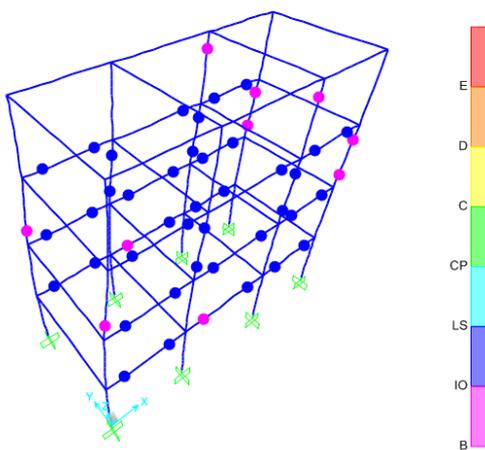


图 46 Pushover 工况第 5 步出铰状况

为了更清楚了解达到结构性能点时结构的状况，可改变 Pushover 工况定义中监测位移的位移值和结果保存中的保存状态的最小数量，使达到结构的性能点时，正好处于 Pushover 工况的某一子步或者与某一子步非常接近。

在此模型中，将荷载控制中的监测位移值调整为 0.2m ，把结果保存中的保存状态的最小数量改为 50 时，计算结果如图 49 所示，对比图 49 和图 50 的结果，第 45 步的结果可

SAP2000 案例教程：钢框架 PUSHOVER 分析

作为性能点状态。如图 51 为第 45 步的出铰状态，塑性铰主要集中在底部三层的梁上，部分铰超过 IO 进入到 LS 阶段。

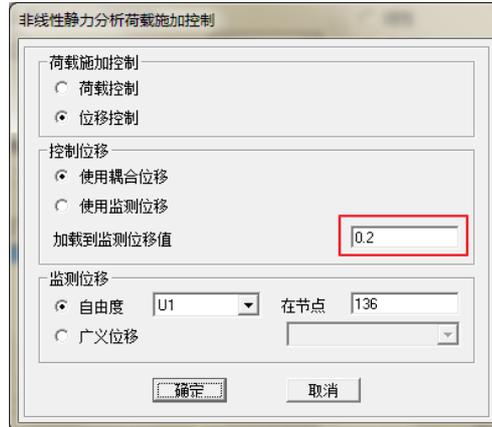


图 47 调整后的荷载控制数据

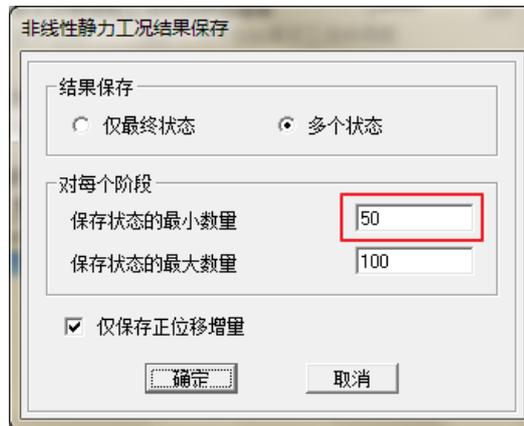


图 48 调整后的结果保存数据

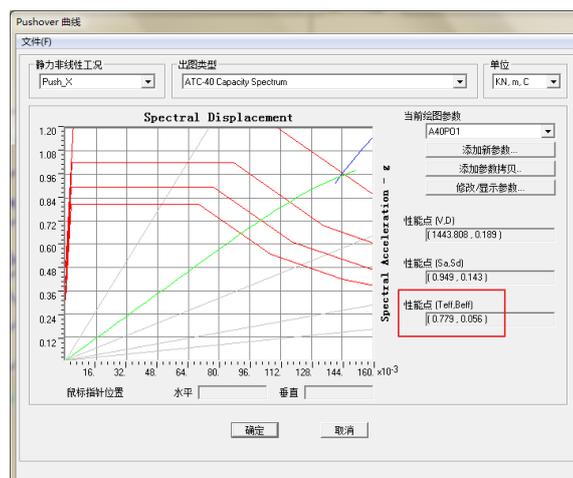


图 49 调整后的 Pushover 曲线

Table Display

File Edit

Pushover Curve Demand Capacity - ATC40 - Push_X

Step	Teff	Beff	SdCapacity	SaCapacity	SdDemand	SaDemand	Alpha	PPPhi
22	0.748862	0.030000	0.066116	0.474616	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
23	0.748862	0.030000	0.069121	0.496189	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
24	0.748862	0.030000	0.072127	0.517763	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
25	0.748862	0.030000	0.075132	0.539336	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
26	0.748862	0.030000	0.078137	0.560910	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
27	0.748862	0.030000	0.081142	0.582483	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
28	0.748862	0.030000	0.084148	0.604057	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
29	0.748862	0.030000	0.087153	0.625630	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
30	0.748862	0.030000	0.090158	0.647203	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
31	0.748862	0.030000	0.091753	0.658654	0.159772	1.146929	0.703913	1.330993
32	0.749312	0.030496	0.094769	0.679488	0.159292	1.142108	0.703921	1.330842
33	0.750195	0.031426	0.098648	0.705635	0.158424	1.133213	0.703936	1.330546
34	0.751253	0.032515	0.101681	0.725283	0.157447	1.123056	0.703957	1.330195
35	0.752987	0.034182	0.106568	0.756646	0.156044	1.107931	0.703881	1.329720
36	0.754295	0.035411	0.109602	0.775489	0.155065	1.097157	0.703779	1.329407
37	0.756712	0.037536	0.115197	0.809873	0.153489	1.079085	0.703485	1.328933
38	0.758451	0.039100	0.118232	0.827409	0.152385	1.066418	0.703233	1.328642
39	0.760115	0.040516	0.121268	0.844943	0.151446	1.055210	0.702994	1.328365
40	0.762873	0.042818	0.125886	0.870791	0.150006	1.037635	0.702872	1.327960
41	0.766314	0.045782	0.130387	0.893843	0.148257	1.016347	0.703226	1.327524
42	0.770874	0.049739	0.135309	0.916642	0.146108	0.989796	0.703223	1.326414
43	0.773920	0.052320	0.138404	0.930242	0.144821	0.973372	0.703295	1.325653
44	0.777121	0.054987	0.141513	0.943318	0.143574	0.957057	0.702907	1.324797
45	0.780396	0.057653	0.144622	0.955968	0.142407	0.941328	0.702652	1.323976
46	0.783589	0.060147	0.147726	0.968543	0.141392	0.927013	0.702374	1.323233
47	0.786690	0.062464	0.150830	0.981114	0.140512	0.913997	0.702107	1.322520
48	0.787090	0.062755	0.151237	0.982761	0.140406	0.912378	0.702072	1.322428

Current Sort String

Current Filter String

Done

图 50 调整后的分析数据表格显示

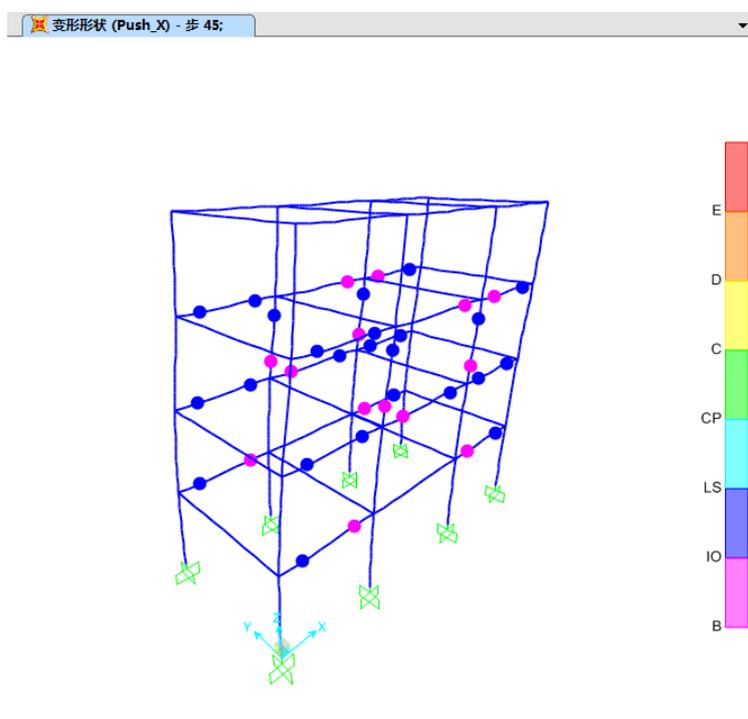


图 51 性能点时的出铰状态

7.5 层间位移角统计

由于 SAP2000 软件中不包含楼层的概念，故无法直接输出层间位移，需要工程师自行

SAP2000 案例教程：钢框架 PUSHOVER 分析

对结果进行统计，由于在分析前已经定义了广义位移，故可在广义位移基础之上进行统计。在本例中，Pushover 工况第 45 步的结果作为最终判断的标准。

7.5.1 导出位移结果

完成编号的基础上，重新运行分析，再对节点位移进行输出。节点位移结果导出时，在显示>显示表对话框中点击修改/显示选项，弹出输出选项对话框，在弹出的如图 52 对话框中的非线性静力结果中选择“一步一步”，此时，才可以输出非线性静力工况中每一步的结果。



图 52 输出选项对话框

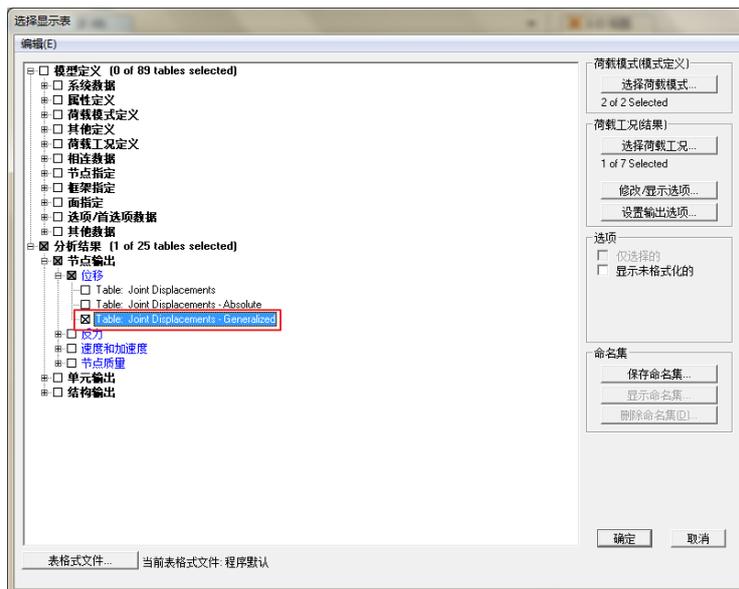


图 53 选择广义位移结果

在选择显示表对话框中，选择分析结果>节点输出>位移>Table: Joint Displacements - Generalized，如图 53 所示。

7.5.3 层间位移角计算及判别

将导出的结果导入到 EXCEL 中，筛选工况 PUSH_X 中第 45 步中的结果，将得到的结果除以层高得到每个节点的位移角，如下表所示。

表 2 节点层间位移角

节点编号	层间位移角	节点编号	层间位移角	节点编号	层间位移角	节点编号	层间位移角
108	0.006036	116	0.013518	124	0.020309	132	0.013325
109	0.006039	117	0.013513	125	0.020314	133	0.013322
110	0.006039	118	0.013513	126	0.020315	134	0.013321
111	0.006036	119	0.013518	127	0.020309	135	0.013324
112	0.006036	120	0.013518	128	0.020309	136	0.013325
113	0.006039	121	0.013513	129	0.020314	137	0.013322
114	0.006039	122	0.013513	130	0.020315	138	0.013321
115	0.006036	123	0.013518	131	0.020309	139	0.013324

每一层中位移角最大的值即为层间位移角。根据抗震规范 5.5.5 节对结构薄弱层弹塑性层间位移的控制，可得多高层钢框架 $\Delta u_p \leq 0.02h$ 。将层间位移角及限值表示为图形如图 54 所示。

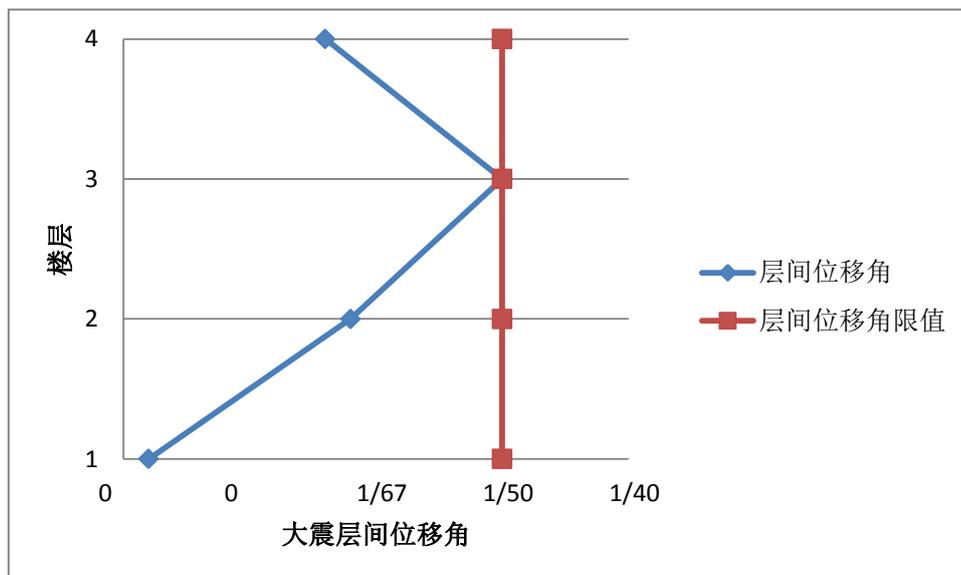


图 54 大震层间位移角

由图可知，层间位移角满足规范限值要求。

注：如要统计反应谱工况下的层间位移角，不能使用此方法，需要定义广义位移进行统计。

8、分析结果与结论

Pushover 分析主要从结构性能点（需求谱与能力谱曲线的交点）、底部剪力—监测位移曲线、层间位移角、塑性铰的分布及出现过程等几个方面对结构在地震中的性能表现进行宏观评价。以下为本案例的 Pushover 分析结果和结论。

表 3 不同地震工况下的底部总剪力

/	小震反应谱方法	小震 PUSHOVER	大震 PUSHOVER
底部总剪力 (KN)	294KN	311	1444

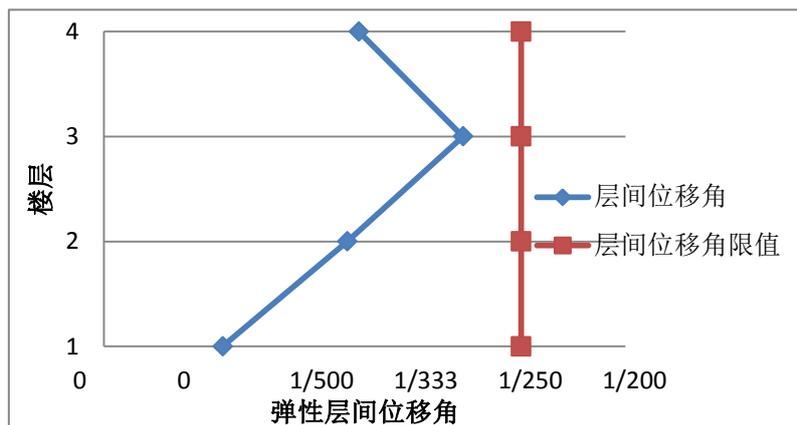


图 55 弹性层间位移角 (反应谱工况)

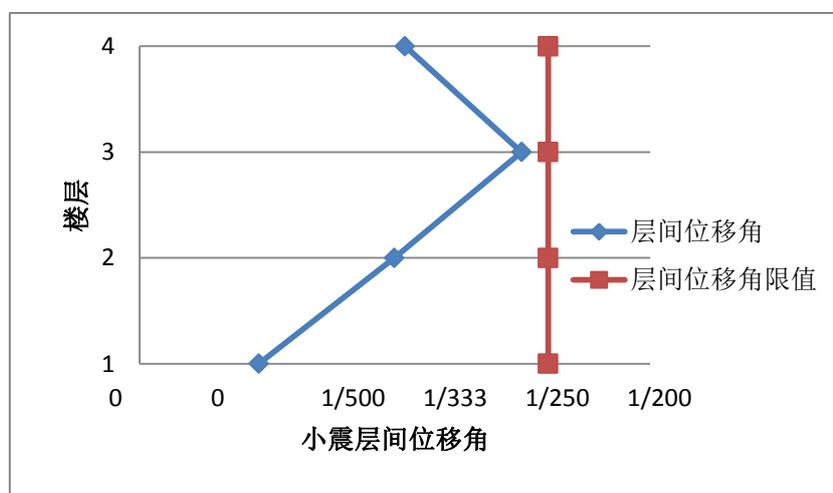


图 56 小震层间位移角 (PUSHOVER 工况)

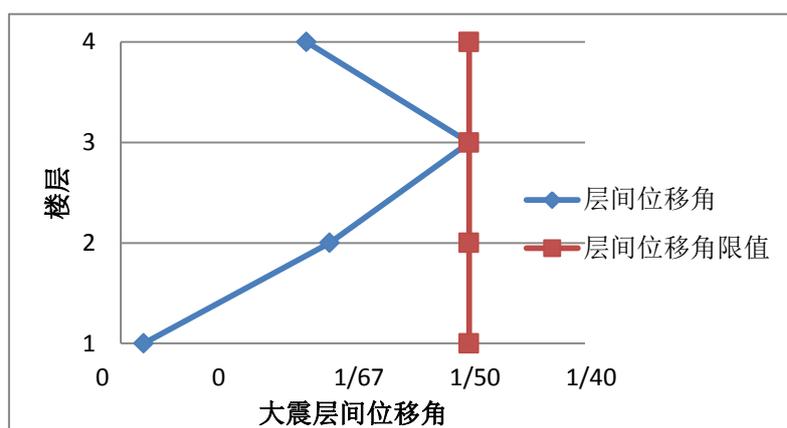


图 57 弹塑性层间位移角 (Pushov 工况)

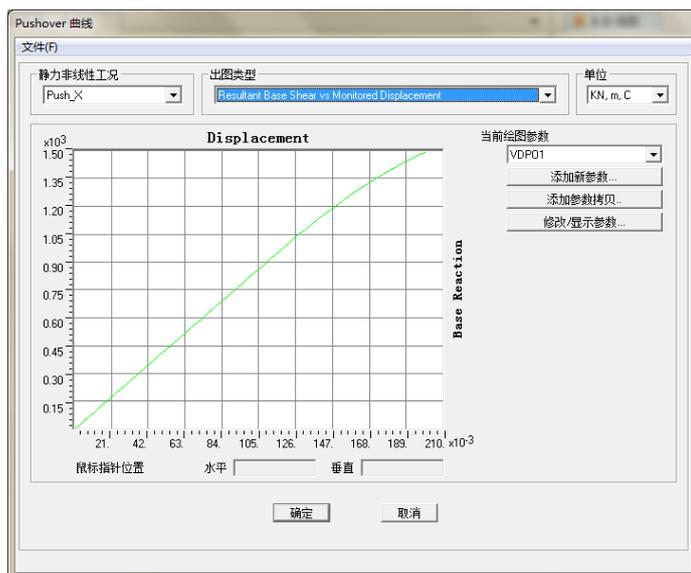


图 58 X 向底部剪力—顶点位移曲线

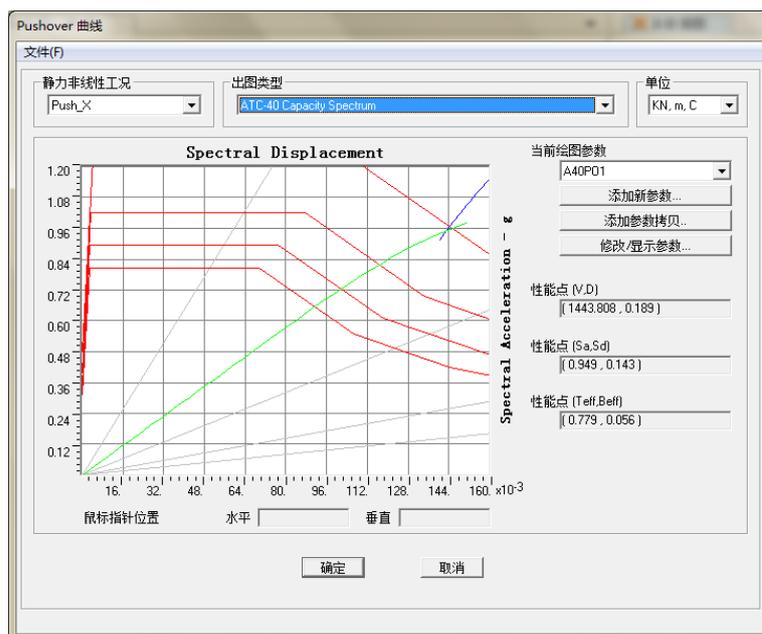


图 59 向大震下结构需求谱与能力谱曲线关系

塑性铰的出现过程：在分析过程中，各类塑性铰共 144 个，随着 Pushover 工况的中推覆力的增加，塑性铰发生屈服和进入塑性的规律如表 4 所示，在性能点处，其塑性铰的分布如图 60 所示。

表 4 X 向推覆力作用下塑性铰发生发展规律

TABLE: Pushover Curve - Push_X									
Step	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0-30	144	0	0	0	0	0	0	0	144
33	142	2	0	0	0	0	0	0	144
34	142	2	0	0	0	0	0	0	144
35	138	6	0	0	0	0	0	0	144
36	138	6	0	0	0	0	0	0	144
37	132	8	2	0	0	0	0	0	144
38	132	6	4	0	0	0	0	0	144
39	132	10	6	0	0	0	0	0	144
40	128	8	8	0	0	0	0	0	144
41	126	6	10	0	0	0	0	0	144
42	126	10	10	0	0	0	0	0	144
43	122	12	14	0	0	0	0	0	144
44	122	14	16	0	0	0	0	0	144
45	120	16	18	0	0	0	0	0	144
46	120	12	24	0	0	0	0	0	144
47	116	14	24	0	0	0	0	0	144
48	114	12	26	0	0	0	0	0	144

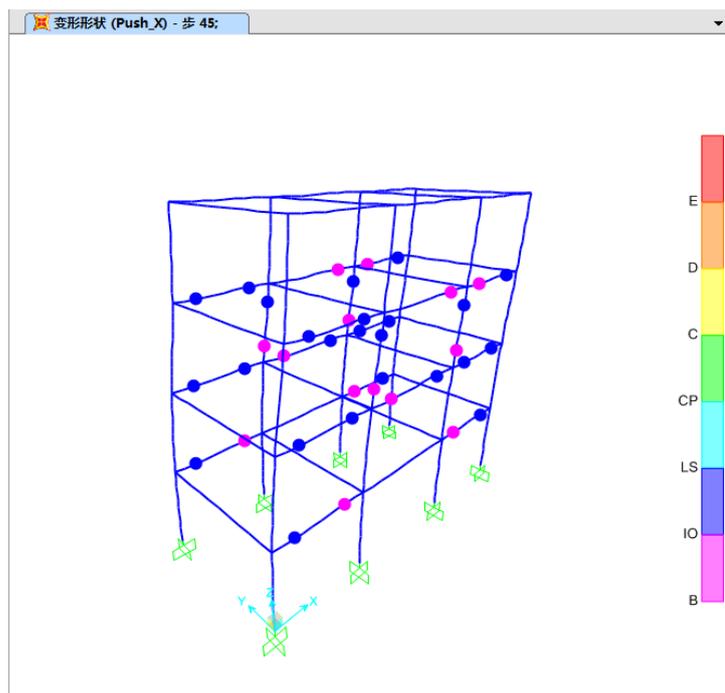


图 60 X 向性能点处的塑性铰分布

结论：通过上述分析可以看出，结构达到性能点处的层间位移角最大值为 $1/50$ ，位于第 3 层，表明结构的相对薄弱层位于第 3 层，但其层间位移角等于规范限值 $1/50$ ，满足规范大震下弹塑性层间位移角限值的要求。

从塑性铰发生和发展看，当达到性能点时，绝大多数塑性铰（120 个）处于弹性工作状态，所有已进入塑性工作状态的塑性铰均处于 CP 状态（防止倒塌）以下，显示结构具有良好的变形性能。通过以上分析结论可知，结构 X 方向的抗震性能满足大震不倒的设防目标。至此，已完成 X 向 Pushover 性能评估，其它加载模式及其他方向的分析可参考以上步骤自行完成。

要点详解

1、默认塑性铰的属性

塑性铰的属性是和构件的截面相关的，对于不同的截面，同种类型的塑性铰的属性也是不同的，这也就是说，结构中采用的截面越多，所需要的塑性铰的属性也越多。如果要对每一个截面定义其塑性铰的属性，需要大量的时间和精力。在 SAP2000 中，程序可以支持对特定的截面指定默认的塑性铰，当指定了默认的塑性铰时，程序将自动计算塑性铰的属性，减少了人工指定塑性铰的大量繁杂工作，提升工作效率。

本小节将介绍程序默认塑性铰属性的计算方法。

1.1 默认钢构件 M 铰属性计算

以框架 6 为例说明 M 铰属性的计算过程。框架截面为 HN400×150×8×13，长度为 5.5m，材料 Q235，其截面属性如图 61 所示。

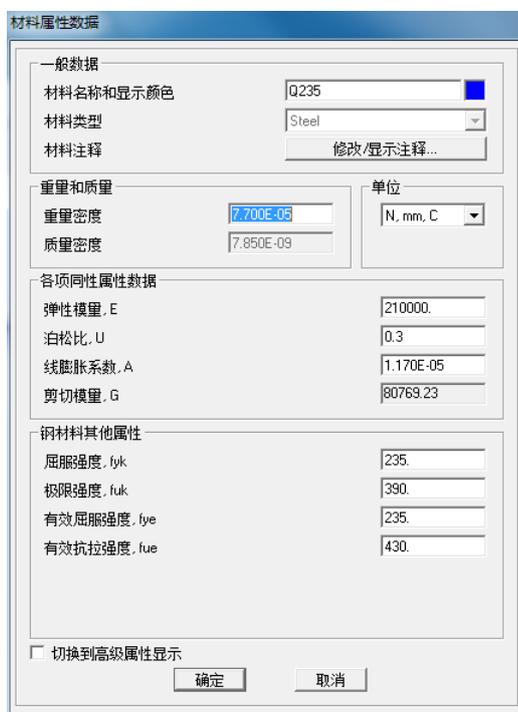


图 61 钢构件材料属性对话框



图 62 框架截面属性 (单位 mm)

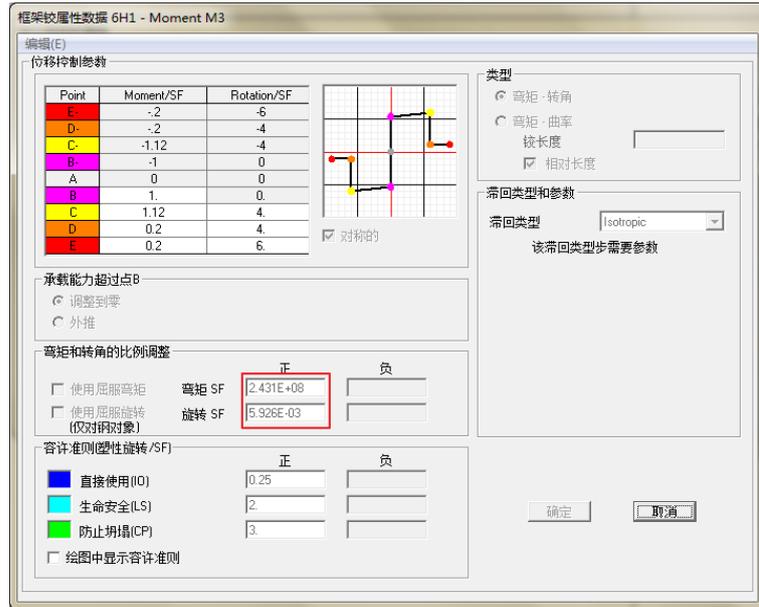


图 63 框架铰属性数据 6H1-Moment M3

1.1.1 屈服弯矩、屈服转角计算

根据 FEMA356 第 5.5.2.2.2 条，对钢梁屈服转角计算公式 5-1 知

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{6EI_b}$$

屈服弯矩计算公式 5-3 知

$$Q_{CE} = ZF_{ye}$$

其中 Z 为截面塑性模量， F_{ye} 为材料有效屈服应力， l_b 为梁长度， E 为弹性模量， I_b 为截面惯性矩。

则此钢梁的屈服转角和屈服弯矩计算如下：

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{6EI_b} = \frac{1034402 \times 235 \times 5500}{6 \times 2.1 \times 10^5 \times 1.791 \times 10^8} = 5.925 \times 10^{-3}$$

$$Q_{CE} = ZF_{ye} = 1034402 \times 235 = 2.431 \times 10^8$$

其值与默认生成的塑性铰完全一致。

1.1.2 骨架曲线及容许准则计算

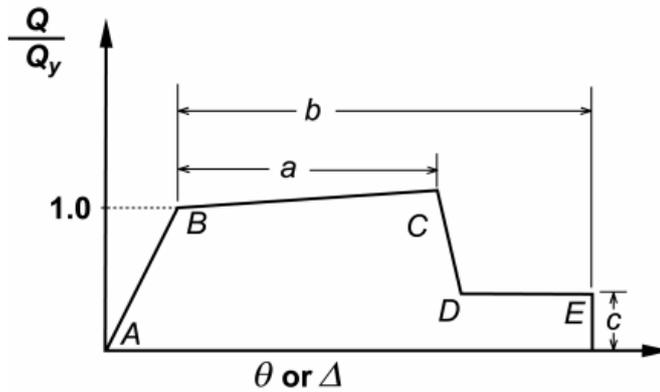


图 64 塑性铰骨架曲线示意图

由 FEMA356 第 5.5.2.2.2 条知, B 点到 C 点的斜率是 A 点到 B 点斜率的 3%, 在 SAP2000 中, 塑性铰在弹性阶段是没有转角的, 故 B 点到 C 点的斜率考虑 0.03。

根据如表 5 所示的 FEMA 表计算方法, 进行相关计算。

表 5 钢构件梁 M 铰可接受准则

Table 5-6 Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components

Component/Action	Modeling Parameters			Acceptance Criteria				
	Plastic Rotation Angle, Radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, Radians				
	a	b		IO	Primary		Secondary	
			LS		CP	LS	CP	
Beams—flexure								
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$	9 θ_y	11 θ_y	0.6	1 θ_y	6 θ_y	8 θ_y	9 θ_y	11 θ_y
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}$	4 θ_y	6 θ_y	0.2	0.25 θ_y	2 θ_y	3 θ_y	3 θ_y	4 θ_y
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used							

$$\text{由 } \frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{150}{2 \cdot 13} = 5.769 > \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}} = \frac{65}{\sqrt{235}} = 4.24 \text{ 知,}$$

$$a = 4\theta_y, \quad b = 6\theta_y, \quad c = 0.2, \quad IO = 0.25\theta_y, \quad LS = 2\theta_y, \quad CP = 3\theta_y$$

SAP2000 案例教程：钢框架 PUSHOVER 分析

换算成弯矩/屈服弯矩、转角/屈服转角，则

$$B=\{0,1\}, C=\{4,1.12\}, D=\{4,0.2\}, E=\{6,0.2\}$$

容许准则塑性转角/屈服转角分别对应于

$$IO = 0.25, LS = 2, CP = 3$$

与程序自动生成的塑性铰属性完全吻合。

1.2 默认钢构件 P-M-M 铰计算

以钢框架柱 32 为例说明 P-M-M 铰属性的计算过程。框架截面为 HW400×400×18×28，长度为 3.6m，材料 Q235。

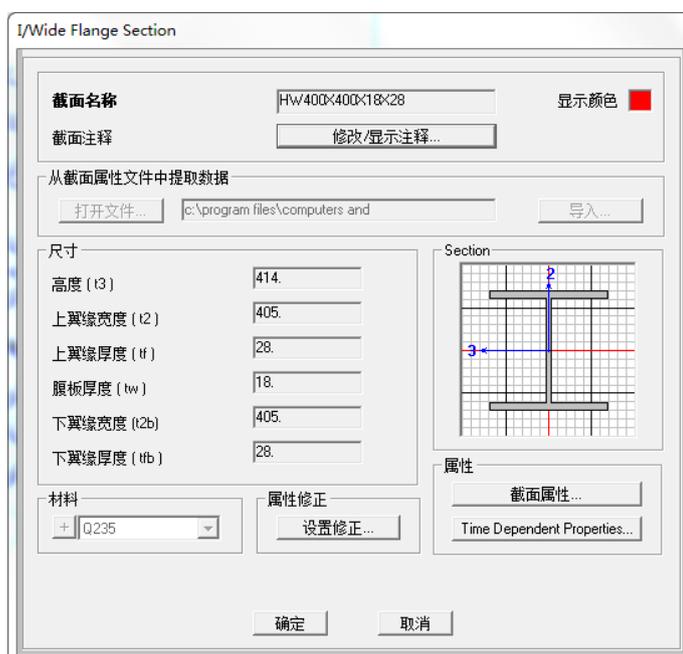


图 65 框架截面尺寸数据（单位 mm）



图 66 框架截面属性 (单位 mm)

1.2.1 相关面计算



图 67 铰相关面 32H1-Interacting P-M2-M3

钢构件 P-M-M 铰相关面计算在 SAP2000 中共提供 5 种计算方法图 67 所示, 对于程序默认生成的钢 P-M-M 铰, 则使用用户定义的相关面, 其相关的数值计算均由钢材的有效屈服应力 F_{ye} 计算得到。

1.2.2 屈服转角计算



图 68 框架铰属性数据 32H1-Interacting P-M2-M3

根据 FEMA356，对钢柱屈服转角计算公式 5-2 知

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_c}{6EI_c} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}} \right)$$

当取轴力为 0 时，计算得到

$$\theta_y = \frac{ZF_{ye}l_c}{6EI_c} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}} \right) = \frac{4953978 \times 235 \times 3600}{6 \times 2.1 \times 10^5 \times 9.352 \times 10^8} = 3.557 \times 10^{-3}$$

为图 68 中的转角比例系数。

1.2.3 骨架曲线及容许准则计算

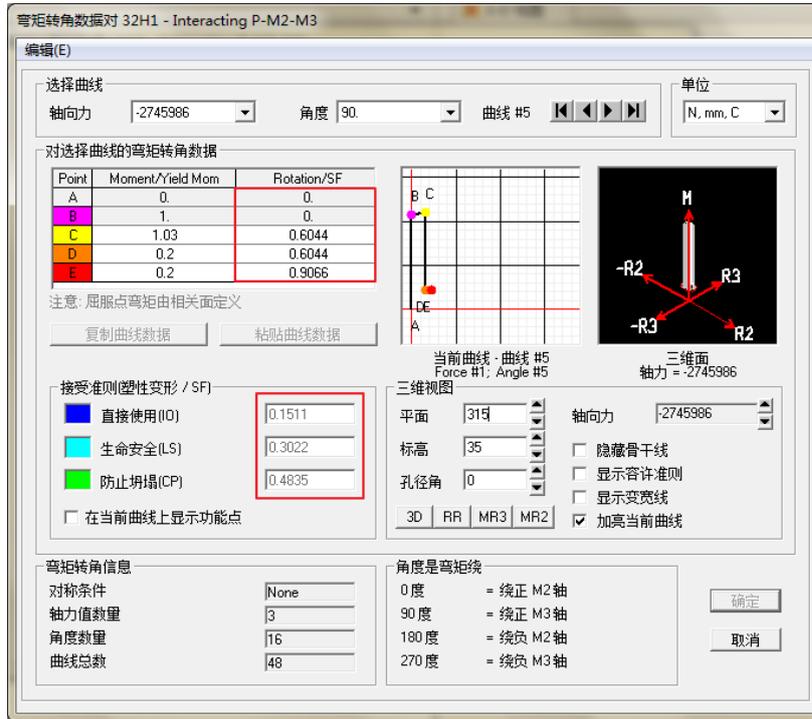


图 69 弯矩转角数据对 32H1-Interacting P-M2-M3

表 6 钢柱 PMM 较可接受准则

Table 5-6 Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components (continued)

Component/Action	Modeling Parameters			Acceptance Criteria				
	Plastic Rotation Angle, Radians		Residual Strength Ratio	IO	Plastic Rotation Angle, Radians			
	a	b			Primary		Secondary	
				LS	CP	LS	CP	
For 0.2 < P/P _{CL} < 0.50								
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{260}{\sqrt{F_{ye}}}$	— ³	— ⁴	0.2	0.25θ _y	— ⁵	— ³	— ⁶	— ⁴
b. $\frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{400}{\sqrt{F_{ye}}}$	1θ _y	1.5θ _y	0.2	0.25θ _y	0.5θ _y	0.8θ _y	1.2θ _y	1.2θ _y
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used							

当轴力 $P_1 = 2963336N$ 时，其转角

$$\theta_{y1} = \frac{ZF_{ye}l_c}{6EI_c} \left(1 - \frac{P_1}{P_{ye}} \right) = 2.148 \times 10^{-3}$$

则知 $\frac{\theta_{y1}}{\theta_y} = 0.604$ 。

由表 5-6,

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{405}{2 \cdot 28} = 7.232 > \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}} = \frac{65}{\sqrt{235}} = 4.24$$

$$0.2 < P_1 / P_{CL} < 0.5$$

根据表 6 可知

$$a = \theta_{y1}, \quad b = 1.5\theta_{y1}, \quad c = 0.2, \quad IO = 0.25\theta_{y1}, \quad LS = 0.5\theta_{y1}, \quad CP = 0.8\theta_{y1}$$

换算成弯矩/屈服弯矩、转角/屈服转角，则

$$B = \{0, 1\}, \quad C = \{0.604, 1.03\}, \quad D = \{0.604, 0.2\}, \quad E = \{0.906, 0.2\}$$

容许准则塑性转角/屈服转角分别对应于

$$IO = 0.151, \quad LS = 0.302, \quad CP = 0.483$$

与程序自动生成的塑性铰属性完全吻合。

注： P_{CL} 为柱抗压强度的下限值，此值按照美国规范计算。

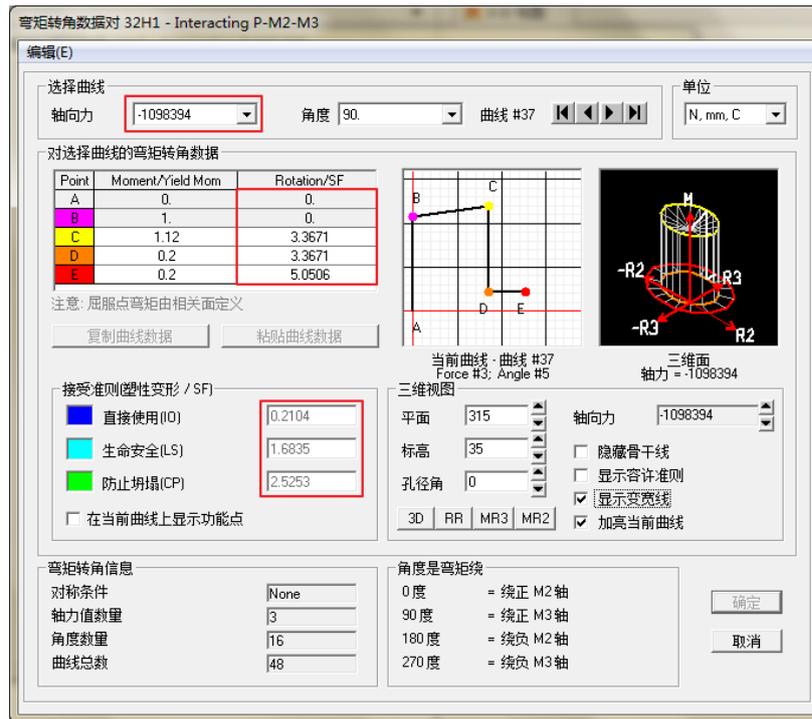


图 70 弯矩转角数据对 32H1-Interacting P-M2-M3

表 7 钢柱 PMM 较可接受准则

Table 5-6 Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components

Component/Action	Modeling Parameters			Acceptance Criteria				
	Plastic Rotation Angle, Radians	Residual Strength Ratio	c	Plastic Rotation Angle, Radians				
				IO	Primary		Secondary	
a	b			LS	CP	LS	CP	
Columns—flexure ^{2,7}								
For $P/P_{CL} < 0.20$								
a. $\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq \frac{300}{\sqrt{F_{ye}}}$	9a _y	11a _y	0.6	1a _y	6a _y	8a _y	9a _y	11a _y
b. $d \frac{b_f}{2t_f} \geq \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq \frac{460}{\sqrt{F_{ye}}}$	4a _y	6a _y	0.2	0.25a _y	2a _y	3a _y	3a _y	4a _y
c. Other	Linear interpolation between the values on lines a and b for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lowest resulting value shall be used							

当轴力 $P_2 = 1098394N$ 时，

$$\frac{\theta_{y2}}{\theta_y} = 1 - \frac{P_2}{P_{ye}} = 0.842$$

由表 5-6,

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{405}{2 \cdot 28} = 7.232 > \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}} = \frac{65}{\sqrt{235}} = 4.24,$$

$$P_2 / P_{CL} < 0.2$$

则知 $a = 4\theta_{y2}$, $b = 6\theta_{y2}$, $c = 0.2$, $IO = 0.25\theta_{y1}$, $LS = 2\theta_{y1}$, $CP = 3\theta_{y1}$

换算成弯矩/屈服弯矩、转角/屈服转角

$$B = \{0, 1\}, C = \{3.368, 1.12\}, D = \{3.368, 0.2\}, E = \{5.052, 0.2\}$$

容许准则塑性转角/屈服转角分别对应于

$$IO = 0.211, LS = 1.684, CP = 2.526$$

与程序自动生成的塑性铰属性完全吻合。

2、加载模式的定义

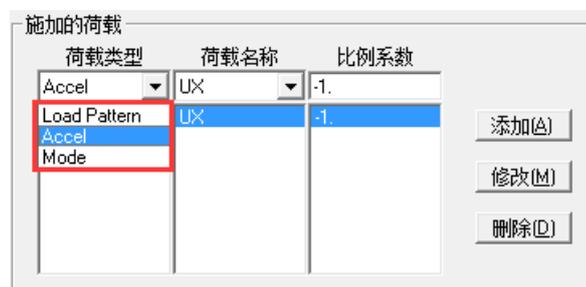


图 71 施加的荷载对话框

静力 Pushover 工况定义过程中, 在施加的荷载栏, 可以选择三种不同类型的荷载形式施加在结构上, 包含荷载模式、加速度、振型。选择荷载模式时, 可以将已经定义好的一个或者多个荷载模式以一定的比例施加到结构中; 选择加速度时, 可以将加速度施加在结构整体坐标系下任意 X、Y、Z 方向, 施加到每个节点的力与节点质量成正比; 选择模态时, 需要选择模态的振型, 此时施加到每一个节点的力和振型的位移、振型角频率平方及节点质量成正比。

在施加荷载时, 可以选择一种或者多种不同类型的荷载施加在一个工况中考虑不同的受力情况。对于本例来说, 选择的为加速度, 即为结构施加了与质量分布成正比例的荷载。

3、ATC-40 能力谱参数

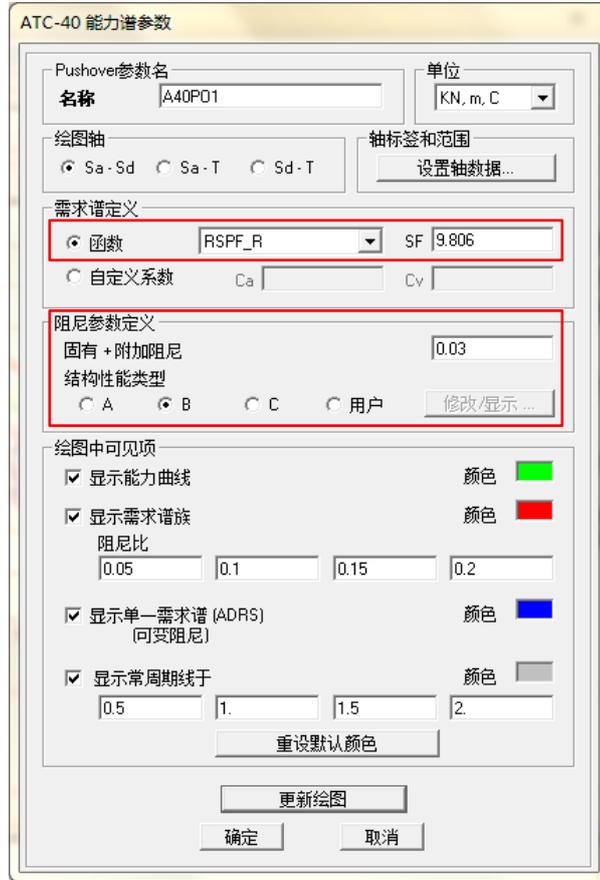


图 72 ATC-40 能力谱参数对话框

3.1 绘图轴

绘图轴的共有三种，分别为 Sa-Sd（谱加速度-谱位移）、Sa-T（谱加速度-周期）、Sd-T（谱位移-周期）。在通常情况下按照默认的选项为 Sa-Sd，此时显示 Pushover 曲线时，竖轴为谱加速度，要注意谱加速度的单位与中国反应谱中的地震影响系数不同，两者之间相差重力加速度值。

3.2 需求谱定义

需求谱的定义可以通过两种办法来确定，一种为导入函数，另外一种为自定义 Ca、Cv 系数。

当通过函数来定义需求谱时，需先定义代表相应地震水准的反应谱函数。在函数中选择定义好的反应谱函数，在 SF 项填写重力加速度值（填写此数值时注意单位，如果单位为 m，则填写 9.806，如果单位为 mm，此值则为 9806），使中国反应谱函数的竖向坐标从地震影响系数转换为加速度。本例即采用这种方法，参见第 5 节。

如果采用自定义系数，需要将中国反应谱函数和美国反应谱函数的对应关系找出，再计

算 C_a 、 C_v 值。其近似关系如下所示：

$$\text{当 } 0.1s < T \leq T_g \text{ 时, } 2.5C_a = \eta_2 \alpha_{\max}, T_g = C_v / (2.5C_a)$$

$$\text{当 } T_g < T \leq 5T_g \text{ 时, } C_v / T = \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma \eta_2 \alpha_{\max}, T_g = C_v / (2.5C_a)$$

$$\text{当 } 5T_g < T \leq 6s \text{ 时, } C_v / T = [\eta_2 0.2^\gamma - \eta_1 (T - 5T_g)] \alpha_{\max}, T_g = C_v / (2.5C_a)$$

本例中，施加 Pushover 工况方向的主振动周期为 $T=0.75s$ ，结构阻尼比 $\zeta = 0.03$ ，根据

$$\text{抗震规范 5.1.5 条知 } \gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \zeta}{0.3 + 6\zeta} = 0.942, \eta_2 = 1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.08 + 1.6\zeta} = 1.156, \text{ 则}$$

$$C_v = \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma \eta_2 \alpha_{\max} T_g = 0.47, C_a = C_v / (2.5T_g) = 0.378$$

3.3 阻尼参数定义

当结构承受地震荷载作用而进入到塑性阶段后，阻尼发挥作用。阻尼可看作是黏滞阻尼和滞回阻尼的组合。黏滞阻尼是结构本身的固有阻尼，而滞回阻尼则和滞回环内的面积相关。结构的等效阻尼可用如下方程表示：

$$\beta_{eff} = k\beta_0 + \beta_c$$

其中， β_{eff} 为结构等效粘滞阻尼， β_0 为滞回阻尼经计算得到的等效黏滞阻尼， β_c 为结构固有的黏滞阻尼。

“固有+附加阻尼”项，此处输入的数值结构本身固有的黏滞阻尼，可以按照规范，一般的混凝土结构使用 0.05，钢结构为 0.02~0.03。对应于上式中的 β_c 项。

k 是对从理想滞回环得到的等效黏滞阻尼 β_0 的折减，根据结构行为类型的不同 k 的取值不同，结构类型为 A 时， $k = 1$ ，表示结构具有良好的耗能能力；结构类型为 B 时， $k = 2/3$ ，表示结构具有中等的耗能能力；结构类型为 C 时， $k = 1/3$ ，表示结构的耗能能力不佳。

结构行为类型的分类如下表所示，其中，地震动持续时间的长短相当于我国规范中的远近地震。当地震发生时，处于近震地区的结构，地震持续时间相对较短，结构滞回环数量少，结构刚度下降小，滞回环饱满；处于远震地区的结构，地震持续时间相对较长，结构滞回环

数量较多，结构刚度下降较大，滞回环狭窄。

表 8 结构行为类型

震动持续时间	新结构	现有结构	旧结构
短	A	B	C
长	B	C	C

4、其它求解性能点的方法

SAP2000 在 Pushover 分析中除了提供 ATC-40 能力谱求解性能点的方法外，还提供了目标位移法、等效线性化法和位移修正法。

目标位移法对于建立 Pushover 曲线表征结构的弹塑性荷载-位移行为，与能力谱法在本质上是相同的；在给定地震水准作用下求解弹塑性变形需求的方法与能力谱法不同。目标位移法的基本思想是建立控制点的目标位移，一般将建筑顶层的质量中心定为结构的位移控制点。

等效线性化方法的假定：非线性 SDOF 体系的最大位移可以通过线弹性 SDOF 体系来估算，线弹性 SDOF 体系的周期和阻尼比采用等效周期和等效阻尼比，大于非线性 SDOF 体系的初始值。改进后的等效线性化方法仍基于 ATC40 规定的流程，但改进了等效周期和等效阻尼比的计算公式，并且引入了新的技术来求取性能点。

位移修正法是对目标位移法的修正，主要是对求解公式中的系数提出了改进的意见。

能力谱法和等效线性化方法都需要对应不同阻尼比的多条反应谱曲线，而目标位移法仅使用阻尼比为 0.05 的反应谱曲线。

目标位移法和等效线性化法都使用了经验公式，且这些经验公式通过了大量动力分析的校准。

能力谱方法使用了割线周期和阻尼比，而不是弹性周期和 0.05 的阻尼比。除了这一点，能力谱方法可以被视为线性结构反应谱的扩展应用。

参考文献

- 1、FEMA356
- 2、Pushover 分析在建筑工程中的应用