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

I

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/m²。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

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

表 1 构件截面(Q235)

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/mm²,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。

SAP2000 案例教程: 钢框架 PUSHOVER 分析

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
重里和质里	单位
重量密度	7.700E-05 N, mm, C 💌
质量密度	7.850E-09
各项同性属性数据	
弹性模量,E	210000.
泊松比,∪	0.3
线膨胀系数,A	1.170E-05
剪切模里,G	80769.23
钢材料其他属性	
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.
切换到高级属性显示	

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。

	B(V)				
达律命名列	22				_
项类型	Element L	abels - J	oint		•
□ 仅列出	出洗择项名称				
	- **1				
目切里新和	不会控制			_	
前缀		第	一重标签顺序	ΙZ	•
下一号	100	第	二重标签顺序	Y	-
僧里	1	- - 	小位数	0	_
				,	
わわりまき	h Element Labels Lab	1. A.			
「石朴列表」	J Element Labels - Jo	int			
- 名称列表/	Current Name	int	New Nar	ne	
名称列表/	Current Name	int	New Nar 1	ne	•
1 2	Current Name		New Nar 1 2	ne	•
当前列表) 1 2 3	Current Name 1 2 3		New Nar 1 2 3	ne	^
当称列表/ 1 2 3 4	Current Name 1 2 3 4		New Nar 1 2 3 4	ne	•
日本 1 2 3 4 5	Current Name		New Nai 1 2 3 4 5	ne	^
日本 1 2 3 4 5 6	Current Name 1 2 3 4 5 6		New Nat 1 2 3 4 5 6	ne	
名称列成/ 1 2 3 4 5 6 7	Current Name 1 2 3 4 5 6 7		New Nat 1 2 3 4 5 6 7	ne	
名称列次/ 1 2 3 4 5 6 7 8	Current Name 1 2 3 4 5 6 7 8		New Nat 1 2 3 4 5 6 7 7 8	ne	
名林列次) 1 2 3 4 5 6 6 7 8 9	Current Name 1 2 3 4 5 6 7 8 9		New Nat 1 2 3 4 5 6 7 7 8 9	ne	
名林 刘 成) 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Current Name 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10		New Nat 1 2 3 4 5 6 7 7 8 9 9	ne	
名林沙太) 1 2 3 4 5 6 7 7 8 9 10	Current Name Curre		New Nat 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 10	ne	
名林沙太) 1 2 3 4 5 6 6 7 7 8 9 9 10	5 Clement Labels - 30 Current Name 2 3 4 5 6 7 8 9 10		New Na 1 2 3 4 5 6 7 7 8 9 10	ne	

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 Definitions1-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。

編集(5) ● 個 建型定义 (1 of 76 tables selected) ● 目 建位定义 ● □ 目 性空义 ● □ 目 性空 ● □ 目 世 回 目 世 回 目 世 世 回 目 世 世 回 目 世 世 回 目 世 世 回 目 世 世 回 目 世 世 回 目 世 世 回 世 回	选择表进行交互式编辑	
● 図 視望空义 (1 of 76 tables selected) 荷鉄現式倶式定义) ● 図 視空文 ● 図 技空义 ● □ 教授支援 ● 図 技定义 ● □ 教授支援 ● 図 技巧之义 ● □ 教授支援 ● 図 技巧之义 ● □ 教授支援 ● 図 技巧之义 ● □ 教授支援 ● 図 大倍之义 ● □ 教授支援 ● □ 分子(立法) ● □ 教授支援 ● □ 公子(立法) ● □ 教授 ● □ 小(立法) ● □ 公子(立法) ● □ ○ 小(古法) ● □ 教授 ● □ ○ 小(古法) ● □ 公子(立法) ● □ ○ 小(古法) ● □ 当会(立法) ● □ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	编辑(E)	
占未确定な互编辑选择来	● 図 板型定义 (1 of 76 tables selected) ● 国 板型定义 ● 国 板型定义 ● 国 其後定义 ● 国 其後定义 ● 国 其後定义 ● 国 其後定 ● 国 其後定义 ● 国 其後定义 ● 国 其後定 ● 国 其後定义 ● 国 其後定 ● 国 其後定 ● 国 其後定 ● 国 美術定 ● 国 董士 ● 国 董士	荷號模式(模式定义) 這择荷號模式 2 of 2 Selected 這项 ① ⑦ ① ⑦ ① ⑦ ① ⑦ ① ⑦ ② ⑦ ⑦ ② ⑦ ② ② ⑦ ③ ⑦ ⑦ ○ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ② ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑧ ⑦ ⑧ ⑧ ② ○ ⑦ ○ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑦ ⑧ </th
AN MARKAN AND AND AND AND AND AND AND AND AND A	点击确定交互编辑选择表	

图 10 交互式数据库编辑对话框

SAP2000 案例教程:钢框架 PUSHOVER 分析

3	五式	数据库编辑-(Generalized	l Displaceme	nt Definiti	ons 1 - Tra	nslational				
ſ	文件(F) Excel 编	辑(E) 视图	图(V) 选项(C))						
						Generalize	d Displacemer	nt Definitions 1	- Translational	•	复制
L		GenDispl	Joint	U1SF	U2SF	U3SF	R1SF	R2SF	R3SF		粘贴
L		Text	Text	Unitless	Unitless	Unitless	m/rad	m/rad	m/rad		插入粘贴
	1	STORY1_1	100	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00000		
L	2	STORY1_1	108	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
											附加空行
											查找 ▲
											到 Excel
											从 Excel
											取消 Excel
											高级选项
											取消上一步操作 应用到模型
											完成
L	Only [)isplay Import Lo	og if Error or V	Varning Occurs	:				覆盖模式关闭		

图 11 交互式数据库编辑对话框

A	В	С	D	E	F	G	H
TABLE: 0	eneraliz	ed Displa	icement D	efinition	ns 1 - Tr	anslatio	nal
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

能信达

交	交互式数据库编辑- Generalized Displacement Definitions 1 - Translational										
	之件(F) Excel 编	辑(E) 视图	图(V) 选项(C))						
						Generalize	ed Displacemer	nt Definitions 1	- Translational	-	复制
		GenDispl	Joint	U1SF	U2SF	U3SF	R1SF	R2SF	R3SF		粘贴
		Text	Text	Unitless	Unitless	Unitless	m/rad	m/rad	m/rad		插入粘贴
	1	STORY1_1	100	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		R#Hn#LAL
	2	STORY1_1	108	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	3	STORY1_2	101	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	4	STORY1_2	109	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		附加空行
	5	STORY1_3	102	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	6	STORY1_3	110	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	7	STORY1_4	103	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	8	STORY1_4	111	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		The former of th
	9	STORY1_5	104	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		EI Excel
	10	STORY1_5	112	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		从 Excel
	11	STORY1_6	105	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		取消 Excel
	12	STORY1_6	113	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		宣犯进而
	13	STORY1_7	106	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	14	STORY1_7	114	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		取消上一步操作
	15	STORY1_8	107	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		应用到模型
	16	STORY1_8	115	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		宁成
	17	STORY2_1	108	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	18	STORY2_1	116	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		
	19	STORY2_2	109	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	-	
L) nly D	isplay Import Lo	g if Error or V	Varning Occurs					覆盖模式主	ÉÌJ	

图 13 EXCEL 数据导入

交互交	交互式数据库编辑- Generalized Displacement Definitions 1 - Translational										
文件	(F) Excel 编	辑(E) 视图	图(V) 选项(C))							
Generalized Displacement Definitions 1 - Translational											复制
	GenDispl	Joint	U1SF	U2SF	U3SF	R1SF	R2SF	R3SF		•	粘贴
	Text	Text	Unitless	Unitless	Unitless	m/rad	m/rad	m/rad			插入粘贴
1	STORY1_1	100	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
2	STORY1_1	108	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
3	STORY1_2	101	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
4	STORY1_2	109	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			附加空行
5	STORY1_3	102	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
6	STORY1_3	110	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
7	STORY1_4	103	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
8	STORY1_4	111	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
9	STORY1_5	104	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			<u></u>
10	STORY1_5	112	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			从 Excel
11	STORY1_6	105	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			取消 Excel
12	STORY1_6	113	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			青柳神石
13	STORY1_7	106	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			高级远坝
14	STORY1_7	114	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			取消上一步操作
15	STORY1_8	107	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			应用到模型
16	STORY1_8	115	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
17	STORY2_1	108	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
18	STORY2_1	116	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000			
19	STORY2_2	109	-1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000		-	
Only	– Display Import Lo	og if Error or V	/arning Occurs					覆盖模式:	关闭		

图 14 数据应用到模型

SAP2000 案例教程: 钢框架 PUSHOVER 分析



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、塑性较指定

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。**

tX	属性	相对距离	
Auto	▼ 0.1		1
			添加(A)
			使多少时代人们
			<u>1986×(m)</u>
			删除(D)
白动框架琼指	完新报		
	ALXA DH		
1			

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置,此位置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置。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置。

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。

自动铰类型			
From Tables In F	EMA 356		-
选择FEMA356表-			
Table 5-6 (Steel	Beams - Flexure)		-
分量类型	自由度		
☞ 主要的	C M2	○ E 点后降荷载	
○ 次要的		○ E 点后外插值	

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 自动框架较指定数据对话框中,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。

SAP2000 案例教程:钢框架 PUSHOVER 分析

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

1	框架较属性数据
	──绞属性命名
	J6H1
	「 铰类型 ○ 力控制(脆性)
	⑦ 变形控制延性)
	Moment M3
	修改/显示铰属性

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。

節這达

位移控制参数一 Point D- C- A	Moment/SF 2 2 -1.12 -1 0	Rotation/SF -6 -4 -4 3 0 0		 类型 ◎ 弯矩・转角 ○ 弯矩・曲率 铰长度 ☑ 相对长度 	1
B C D E 承載能力超速	1. 1.12 0.2 0.2	0. 4. 4. 6.	☑ 对称的	- 滞回类型和参数 滞回类型 该滞回类型	Isotropic 上書要参数
 ○ 调整到到 ○ 外推 ○ 今推 ○ 雪矩和转角的 □ 使用屈用 □ 使用屈用 □ (0774685) 		5 sF2 [243.0845 sF [5.926E-03	́́Ф		6
○ 谷许准则塑性 ○ 直接使 ● 直接使 ● 回 前上期 □ 公式	生旋转/SF) 用(IO) 全(LS) 計攝(CP)	E [0.25 4 [2. [3.	<u>ф</u>	确定	

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</mark>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/显示较属性,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。

滚属性————	
Name	▲ 添加新属性(A)
25H1	
25H2	添加属性类型副本…
26H1	
26H2	
27H1	一般な尾砂の
27H2	
28H1	
28H2	□ 显示铰细节
29H1	☑ 显示生成的属性
29H2	
30H1	
30H2	
31H1	
31H2	75.2
32H1	
32H2	面当
33H1	<u>4X/F</u>
33H2	•

图 25 定义框架铰属性对话框

框架铰属性数据	
32H1	
○ 力控制(脆性) ● 充平(約)を用す()	
◎ 受抗经制度性)	
福定 取消	

图 26 框架铰属性数据

節這达

框架铰属性数据 32H1 - Interacting P-M2-M3	
 ・	 转角比例系数(SF) SF是每屈服转角、2^{MA356}公式 5-2 (仅对钢对象) ● 自定义 SF 3.557E-03
☑ 相对长度	 ▶● 承載能力超过点B ●● 调整到零 ●● 调整到零
□ 对称条件	
○ 弯矩转角相关是圆弧的	M3 190?
C 弯矩转角相关是关于M2和M3双对称的	1807 M2
 ● 弯矩转角相关无对称 指定对称条件要求 	4 07 270?
 在角度0指定曲线?, 90?, 180? and 270?. 	
2. 如果需要,指定附加中间曲线在: 0? < curve an	gle < 360?.
	- 弯矩转角曲线弯曲角度
▲ 抽力数	角度数量 6 16
	● 修改/显示角度
修改/显示弯矩轴	6角曲线数据
修改/显示P-M2-M	13相关面数据

图 27 框架铰属性数据 32H1-Interacting P-M2-M3

区域1定义了较骨架曲线的类型,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*较相 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

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。

	铰相关面 32H1 - Interacting P-M2-M3	
	┌ 交互面选项	
	○ 默认来自相应线对象材料属性	
	C 钢, AISC-LRFD 式(H1-1a)和式(H1-1b)中 φ=1	
	○ 钢, FEMA 356式5-4	
	C 混凝土, ACI318-02 φ=1	
	◎ 用户定义	
	定义/显示用户交互面	
	○ 弯矩转角成正比	
	☞ 弹性·完全塑性	
L		_

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。

独向力 ・1-85.334 対法経曲(約)空短装角数据-	▲ 角度 0.	2 _ 曲线 #33 【 【 】 】 KN, m, C _
Point Moment/Yield Mom A 0. B 1. C 1.12 D 0.2 E 0.2 注意: 屈服点弯矩曲相关面定: 复刻曲线数据	Rotation/SF 0. 0. 4.7865 4.7865 7.1797 义 粘贴曲线数据	-R2 -R3 -R3 -R3 -R3
 接受准则/塑性变形 / SF)→ 直接使用(IO) 生命安全(LS) 防止坍塌(CP) 在当前曲线上显示功能; 	0.2992 2.3932 3.5899	当前曲线 ·曲线 #33 Force #3; Angle #11 单位 #15; 334 三维视图 平面 315 ● 轴向力 1185; 334 平面 315 ● 短裔骨干线 不高 35 ● □ 昆示容许准则 了 显示变宽线 30 RR MR3 MR2 ▼ 加夷当前曲线
弯矩转角信息 对称条件 轴力值数量 角度数量	None 3 16	角度是弯矩线 0度 = 绕正 M2 轴 90度 = 绕正 M3 轴 180度 = 绕负 M2 轴 取消

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。

荷载工况名称 GRAV	设置定义名		荷载工况类型 静力 ▼
初始条件 ・ 零初始条件・从3 ・ 人上次非线性工 重要注释: : 模态荷载工況 所有施加的猎型荷動 施加的荷载 荷载类型 Load Pattern DE Load Pattern DE Load Pattern LN	零初始应力状态开始 只续点状态继续 当前工况中包含前次工 就使用来自工况模态 荷载名称 比例系 /E 0.5 AD1. (5)	况中荷载 MODAL ▼ 教 修改(M) 附除(D)	分析类型 ○ 线性 ● 非线性 ● 非线性阶段施工 □几何非线性参数 ● 无 ○ P4 ● ○ 和大位移 质量源 ● Pevious
其它参数 施加荷载 结果保存 非线性参数	全部荷載 仅最终状态 默认		 ——————————————————————————————

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。

節信达

荷载工况名称	注释	荷载工况类型
Push_X设置定义:	名 修改/显示	● 静力 ● 设计…
初始条件		
○ 零初始条件·从零初始应力状态开	始	○ 线性
◎ 从上次非线性工况终点状态继续	GRAV	▼ ● 非线性
重要注释: 当前工况中包含前	次工况中荷载	○ 非线性阶段施工
模态荷载工况		
所有施加的振型荷载使用来自工况模	态 MODAL ·	• 6 无
施加的荷载		C P-A
荷载类型 荷载名称 比	比例系数	○ P-Δ 和大位移
Mode 💌 1 1.		质里源
Mode 1.	添加(A)	Previous 🗨
	在冬 早年(64)	1
		J
	- 删除(D)	
施加荷载		[
结果保存 多步状态		
		46./13

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。此对话框定义了在非线性分析中,荷载施加的控制方式。 SAP2000 案例教程: 钢框架 PUSHOVER 分析

非线性静	争力分析荷载	說施加控制		
-荷雪 ○ • -控制	城施加控制 荷載控制 [位移控制]](位移			
。 つ 加	使用耦合(使用监测(載到监测位	^{立移} ^{立移} 移值		0.576
	则位移 自由度 广义位移	U1 •	在节点	136
		确定		

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。

非线性静力工况结果保存	
「结果保存 〇 仅最终状态	 多个状态
对每个阶段 保存状态的最小数里 保存状态的最大数里	10
□ 仅保存正位移増量 → → → → → → → → → → → → → → → → → → →	取消

图 35 非线性静力工况结果保存对话框

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**。

快速自由度				通定
空间框架	平面框架	平面轴网	空间桁架	
AN A				取消
				求解器选项
1.15.3.61	×∠半面	XY平面		
表格文件				
□ 在分析后	自动保为 Microso	oft Access 或 Ex	cel 表格数据	
文件名				

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。

エロタチャ	ж .म॥	壮太	作田	点击:
上の名称	兴型 Linear Chaffe	1A383	1F/H Die Mak Diese	运行/不运行工况
ΜΠΠΔΙ	Modal	Not Bun	Do Not Bun	
LIVE	Linear Static	Not Run	Do Not Run	SEAN LONG
Ex	Response Spectrum	Not Run	Do Not Run	删除工况结果
Ey	Response Spectrum	Not Run	Do Not Run	
GRAV	Nonlinear Static	Not Hun	Bun	运行 / 不运行所有
	Noninear static	NULHUN	nuri	
				显示荷载工况树
析信息选项一	,		,	「 实时更新
〕总是显示				
785				冱1丁汀1/丁

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。

ATC-40 能力谱参数
Pushove參数名 名称 A40P01
─ 给图轴
雪求谱定义
○ 自定义系数 Ca Cv Cv
结构性能类型
CA @ B CC C用户
- 绘图中可见项
☑ 显示能力曲线 颜色 💻
✓ 显示需求诺族 颜色 ●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●
0.05 0.1 0.15 0.2
✓ 显示单一需求谱 (ADRS) 颜色 (可变阻尼)
▼ 显示常周期线于 颜色 ●
0.5 1. 1.5 2.
重设默认颜色
更新绘图

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 性能点时铰的分布状况

可通过该小节查看性能点处结构出铰的状态。

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。

Pushover Curve Demand Capacity - ATC40 - Push X									
Step		Teff	Beff	SdCapacity	SaCapacity	SdDemand	SaDemand	Alpha	PFPhi
				m		m			
	0	0.748862	0.030000	0.000000	0.000000	0.159772	1.146929	1.000000	1.00000
	1	0.748862	0.030000	0.043276	0.310658	0.159772	1.146929	0.703913	1.33099
	2	0.748862	0.030000	0.086552	0.621315	0.159772	1.146929	0.703913	1.33099
	3	0.748862	0.030000	0.091753	0.658654	0.159772	1.146929	0.703913	1.33099
	4	0.771364	0.047584	0.135844	0.919095	0.147804	1.000014	0.703209	1.32628
	5	0.817417	0.079767	0.183219	1.103883	0.135957	0.819131	0.701391	1.31660
	6	0.879306	0.116727	0.236108	1.229333	0.128023	0.666571	0.679916	1.29551
	7	0.895310	0.124918	0.250123	1.256164	0.127918	0.642427	0.674882	1.28939
	8	0.915653	0.135753	0.266651	1.280326	0.128057	0.614868	0.668222	1.28133
	9	0.916879	0.136399	0.267634	1.281610	0.128069	0.613279	0.667743	1.28079
	10	0.917744	0.136879	0.268294	1.282353	0.128069	0.612126	0.667357	1.28038
	11	0.919757	0.138102	0.269693	1.283402	0.128038	0.609301	0.666500	1.27939
	12	1.003514	0.186532	0.324368	1.296673	0.127631	0.510210	0.635719	1.24128
	13	1.086629	0.217381	0.380477	1.297193	0.130697	0.445596	0.611507	1.20958
	14	1.169902	0.238087	0.437581	1.287059	0.134348	0.395158	0.592171	1.18334
	15	1.254026	0.253899	0.495405	1.268196	0.141837	0.363091	0.576462	1.16146
	16	1.254829	0.254030	0.495956	1.267981	0.141911	0.362815	0.576328	1.16127
Current Sort String Current Filter String Done									

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。

变形后形状		-
「工况相合」 工况相合	Push_X	•
● 「多値选项 ○ 包絡(最大或最小) ○ 歩	4	
比例调整		
面等值线 □ 在面对象上绘制位移	等值线	
选项 □ 未变形形状 ▼ 三次曲线		

图 44 变形后形状对话框



图 45 Pushover 工况第 4 步出铰状况



图 46 Pushover 工况第5步出较状况

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

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。

非线性静力分析荷载施加控制	
 荷載施加控制 ○ 荷載控制 ○ 位移控制 	
- 控制位移 - ・ 使用耦合位移 - ・ 使用耦合位移 - ・ 使用器の位移 - ・ 使用监测位移 - 加載到监测位移	0.2
监测位移 ○ 自由度 U1 ○ 广义位移	在节点 136
	取消

图 47 调整后的荷载控制数据

#	线性静力工况结果保存	ALC: NAME
	「结果保存 ○ 仅最终状态	● 多个状态
	○对每个阶段 保存状态的最小数量 保存状态的最大数量	50
	☑ 仅保存正位移增量	

图 48 调整后的结果保存数据



图 49 调整后的 Pushover 曲线

		Pushov	ver Curve Der	nand Capacity	/ - ATC40 - Pi	ısh_X								
Step	Teff	Beff	SdCapacity	SaCapacity	SdDemand	SaDemand	Alpha	PFPhi						
			m		m									
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 Current Filter	String String							Current Sort 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

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。

振型形状	基底反应位置 全局 × 0 全局 Y 0 全局 Z 0	 屈曲振型 振型 ● ●<
振型时程结果 © 包络图 © 一歩一歩 © 最后歩	非线性静力结果 ○ 包紹图 ○ 一歩一歩 ○ 最后歩	· 稳态结果
- 直接时程结果 で 包络图 C 一歩一歩 C 最后步	多步静力结果 © 包络图 C 一歩一歩 C 最后歩	ー功率谱密度结果 C RMS C sqrt(PSD)
多值反应组合 © 包络图 C Correspondence C 可能多值		确定取消

图 52 输出选项对话框

辑(E)	
① 使型主义 (0 of 93 tables selected) ◆ □ 新校教部 ◆ □ 新校教部 ◆ □ 新校教部 ◆ □ 新校教会 ◆ □ 新校会 ◆ □ 新校会	「存残様式機式症义」
	- 确定 - 取消

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。

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

表 2 节点层间位移角

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。

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

表 3 不同地震工况下的底部总剪力







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)

SAP2000 案例教程:钢框架 PUSHOVER 分析



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。

			TABLE	: Pushov	er 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

表 4	X 向推覆力作用	下塑性铰发生发展规律
-----	----------	------------



图 60 X 向性能点处的塑性较分布

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。

——船劫据	
材料名称和昆示颜色	Q235
材料类刑	Steel
林树注题	修改/昆示注释
重里和质量	
重量密度	7.700E-05 N, mm, C ▼
质量密度	7.850E-09
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
钢材料其他属性	
屈服强度,fyk	235.
极限强度, fuk	390.
有效屈服强度, fye	235.
有效抗拉强度, fue	430.
切换到高级属性显示	

图 61 钢构件材料属性对话框

属性数据			
截面名称	HN4	00×150×8×13	
属性		,	
橫截面(轴向)面积	7037.	3轴截面模里	895300.
围绕3轴的惯性矩	1.791E+08	2轴截面模里	97760.
围绕2轴的惯性矩	7332000.	3轴塑性模量	1034402.
绕 2-3 惯性矩积	0.	2轴塑性模量	152234.
2轴方向的抗剪截面	3200.	3轴回转半径	159.5165
3轴方向的抗剪截面	3250.	2轴回转半径	32.2788
扭转常数	270673.56	剪切偏心 (x3)	0.
	[·确定	

图 62 框架截面属性(单位 mm)

ŧ(E)					
修控制参数	·			- ***	
Point E- D- C- B- A A B- C C D	Moment/SF 2 1 -1 0 1. 1.12 0.2	Rotation/SF -6 -4 -4 0 0 0 0. 4. 4.		 ご 当短・結角 ご 当短・曲率 読长度 「戸 相对长度 「滞回类型和参数 「滞回类型 	Isotropic
■載能力超 ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●	0.2 过点B 季 的比例调整 服弯拒 雪拒 服症状 旋转 旋转	6. SF [2.431E+08 SF [5.926E-03		· 该带回类型步	需要参 数
(XXXIII 容许准则值 直接 【 生命 【 你止 □ 华图中	18/13年) 健用(ID) 安全(LS) 坍塌(CP) 見示容许准则	E 0.25 2. 3.	负 [[[[确定	INX.

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:

$$\theta_{y} = \frac{ZF_{ye}l_{b}}{6EI_{b}} = \frac{1034402 \times 235 \times 5500}{6 \times 2.1 \times 10^{5} \times 1.791 \times 10^{8}} = 5.925 \times 10^{-3}$$

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

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 Modelin Compor	g Paramet nents	ers and Ac	ceptance C	riteria for	Nonlinear l	Procedures	Sector Structur	al Steel
	Modeling Parameters Plastic Rotation Residual		Acceptance Criteria					
			otation Residual	Plastic Rotation Angle, Radians				
	An Rad	ans Strength Ratio			Primary		Secondary	
Component/Action	а	ь	c	ю	LS	СР	LS	СР
Beams—flexure								
a. $\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \le \frac{418}{\sqrt{F_{ye}}}$	90 _y	118 _y	0.6	10y	60 _y	80 _y	98 _y	118 _y
b. $\frac{\frac{h_f}{2t_f} \ge \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}}{\frac{640}{t_w} \ge \frac{640}{\sqrt{F_{ye}}}}$	40 _y	68 _y	0.2	0.258 _y	20 _y	30 _y	30 _y	48 _y
c. Other	Linear inter web slend	polation betw lerness (sec	veen the valu ond term) sha	es on lines a all be perforn	and b for bond	th flange sle lowest result	nderness (fin ing value sha	st term) and Il be used

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

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

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 较属性的计算过程。框架截面为 HW400×400×18×28, 长度为 3.6m, 材料 Q235。

截面名称	HW400X400X18X28	显示颜色
截面注释	修改/显示注释	
从截面属性文件中提取数	据	
打开文件 c:\p i	rogram files\computers and	导入
尺寸		Section
高度(13)	414.	2
上 翼 缘宽度(t2)	405.	
上翼缘厚度(tf)	28.	3
	18.	
下翼缘宽度 (t2b)	405.	
下翼缘厚度(tfb)	28.	,
		また おお あ 届 財 しょうしょう しょうしょう しょうしょう しょうしょう しょうしょう あんしょう しょうしょう しょう
材料	周田修正	Time Descendent Descetion
± Q235		Time Dependent Properties

图 65 框架截面尺寸数据(单位 mm)

記信达

截面名称	HW	400×400×18×28	
属性		_	
橫截面(轴向)面积	29539.	3轴截面模里	4517778.
围绕3轴的惯性矩	9.352E+08	2轴截面模里	1531950.6
围绕2轴的惯性矩	3.102E+08	。 3 轴塑性模量	4953978.
绕 2-3 惯性矩积	0.	2 轴塑性模量	2325348.
2轴方向的抗剪截面	7452.	3 轴回转半径	177.9302
3轴方向的抗剪截面	18900.	2 轴回转 半径	102.4795
扭转常数	6342792.	剪切偏心 (x3)	0.

图 66 框架截面属性(单位 mm)

1.2.1 相关面计算

交互	<u>_</u> 面选项
0	默认来自相应线对象材料属性
0	钢, AISC-LRFD 式(H1-1a)和式(H1-1b)中 φ=1
С	钢, FEMA 356式5-4
С	混凝土, ACI318-02 φ=1
\odot	用户定义
	定义/显示用户交互面
轴向] 荷载 · 位移 关系
C	弯矩转角成正比
0	弹性-完全塑性
	75

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*_{ve} 计算得到。

1.2.2 屈服转角计算

框架铰属性数据 32H1 - Interacting P-M2-M3	
 ・絞指定类型 ご 弯矩 - 转角 ご 弯矩 - 曲率	转角比例系数(SF) ○ SF是每屈服转角,FEMA356公式 5-2 (仅对钢对象) ○ 自定义 SF 3.557E-03 承載能力超过点B ○ 调整到零 ○ 外推
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	
 管矩转角相关是圆弧的 管矩转角相关是关于M2和M300对称的 管矩转角相关无对称 指定对称条件要求 	M3 1907 1807 2707
 在角度硝定曲线?, 90?, 180? and 270?. 如果需要 指定附加中间曲线在: 0? < curve an 	gle < 360?.
对弯矩转角曲线的轴力 轴力数	弯矩转角曲线弯曲角度 角度数量
修改/显示弯矩轴 修改/显示P-M2-M 	5角曲线数据… 13相关面数据… []

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

编辑(E) 选择曲线 単位 独向力 2745986 小mm, C 对选择曲线的弯矩特角数据 Point Moment/Yield Mom B 0. 0. 0.2 0.30066 注意: 屈服点弯矩由相关面定义 資制曲线数据 上 資制曲线数据 上 資制曲线数据 上 日 1.0 0.2 0.30066 注意: 屈服点弯矩由相关面定义 資制曲线数据 半 指数使用(10) 10.1511 平面 315 中 中 中 1315 中 1315 中 1315 1316 1317 1318 1319 1319 1310 1311 1312
送择曲线 単位 独向力 2745386 角度 90 曲线 #5 単位 N.mm, C N.mm, C N3选择曲线的弯矩转角数据 Point Moment/Yield Mom Rotation/SF A 0. 0. B 1. 0. <t< th=""></t<>
抽向力 2745986 角度 90. 曲线 #5 ■ N.mm, C 对选择曲线的弯旋转角数据 Point Moment/Yield Mom Rotation/SF <
对选择曲线的弯矩转角数据 Point Moment/Yield Mom Rotation/SF A 0. B 1. C 1.03 D 0.2 0.2 0.6044 E 0.2 0.2 0.9066 注意: 屈服点弯矩由相关面定义 夏射曲线发掘 #kllsh曲线发掘 指受难则I叠性变形 / SF) Unitship 直接使用 (IO) 0.1511 重 生物安全(LS) 0.3022
Point Moment/Yield Mom Rotation/SF A 0. 0. B 1. 0. C 1.03 0.6044 D 0.2 0.6044 E 0.2 0.9066 注意: 屈服点弯矩由相关面定义 雪前曲线 = 15 -R3 運動曲线数据 私助出线数据 私助出线数据 当前曲线 = 15 -R3 上 正確和 -R3 上 正確和 -R3 -R3 -R3
A 0. 0. B 1. 0. C 1.03 0.6044 D 0.2 0.6044 D 0.2 0.9066 注意: 屈服点弯短由相关面定义 当前曲线: 曲线 #5 -R2 复制曲线数据 私助出曲线数据 投资准则@性变形 / SF) 当前曲线: 曲线 #5 直接使用(IO) 0.1511 重 接機用(IO) 0.1511 重 生物安全(LS) 0.3022
8 1. 0. C 1.03 0.6044 D 0.2 0.6044 E 0.2 0.9066 注意: 屈服点弯矩由相关面定义 二 重射曲线数据 粘贴曲线数据 当前曲线 #5 接受准则證性变形 / SF) 三 三 重 直接使用 (IO) 0.1511 三 全 生物安全(LS) 0.3022 131
C 1.03 0.0044 D 0.2 0.6044 e 0.2 0.9066 注意: 屈服点弯矩由相关面定义 夏制曲线数据 粘心曲线数据 指發准则證性变形 / SF) 直 直接使用 (IO) 0.1511 生命安全(LS) 0.3022
0.2 0.0044 122 0.9066 注意: 屈服点弯矩由相关面定义 重制曲线数据 粘贴曲线数据 当前曲线 #5 指数第四個程度形 / SF) 直接使用(10) 1511 生命安全(LS) 0.3022
注意:屈服点弯矩由相关面定义 1 0.000 1
注意: 屈服点 当起田相夫 面定义 重制曲线数据 私品曲线数据 当前曲线 :曲线 #5 Hat = 4 A - 2745986 当前曲线 : 曲线 #5 Hat = 2745986 三维视图 平面 315 新 袖力 = -2745986 美 年春安全(LS) 0.3022 标高 35 美 「 隐藏骨干线
日制 送载 推揭 日制 送载 推揭 日前 曲线 由线 推告 Force #1; Angle #5 街 節 曲线 - 曲线 #5 Force #1; Angle #5 街 節 曲线 - 曲线 #5 Force #1; Angle #5 街 節 曲线 - 曲线 #5 Force #1; Angle #5 1511 154 152 154 152 153 153 153 153 153 153 153 153 153 153 15 153 153 153 154 153 153 153 153
当前曲线:曲线,#5 三维面 Force #1; Angle #5 1 接受准则塑性变形 / SF) -2745996 直接使用(10) 0.1511 生命安全(LS) 0.3022
接受准则塑性变形 / SF) Encree #1; Angle #5 轴力 = -2745986 直接使用(I0) 0.1511 平面 315 筆 轴向力 -2745986 单 生命安全(LS) 0.3022 标高 35 量 □ 隐藏骨干线
■ 直接使用(0) 0.1511 ■ 生命安全(LS) 0.3022
□ 1313 · · · · · · · · · · · · · · · · ·
□.3022 标高 35 量 □ 隐藏骨干线
□ I (14835 □ I (14835) □
□ 在当前曲线上显示功能点 3D RR MR3 MR2 □ 加亮当前曲线
「 弯矩转角信息
角度数量 16 180度 = 绕负 M2轴 取当
曲线总数 48 270 度 = 绕负 M3轴

图 69 弯矩转角数据对 32H1-Interacting P-M2-M3

表 6 钢柱 PMM 铰可接受准则

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

	Mod	eling Param	eters	Acceptance Criteria				
	Plastic Rotation		Residual	Plastic Rotation Angle, Radians				
	An Rad	gle, ians	Strength Ratio		Primary		Secondary	
Component/Action	а	ь	c	ю	LS	СР	LS	СР
For 0.2 < <i>P</i> / <i>P</i> _{<i>CL</i>} < 0.50								
a. $\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and $\frac{h}{t_w} \le \frac{260}{\sqrt{F_{ye}}}$	_3	_4	0.2	0.25θ _у	_5	_3	6	_4
b. $\frac{\frac{b_f}{2t_f} \ge \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}}{\text{or}}$ $\frac{h}{t_w} \ge \frac{400}{\sqrt{F_{ye}}}$	10y	1.50 _у	0.2	0.25θ _y	0.50 _y	0.80 _y	1.2θ _y	1.20 _y
c. Other	Linear inter web slend	polation betw erness (seco	veen the valu and term) sha	es on lines a all be perforn	and b for boned, and the	th flange sle lowest result	nderness (firs ing value sha	st term) and II be used

当轴力P1=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

$$a = \theta_{y_1}, b = 1.5\theta_{y_1}, c = 0.2, IO = 0.25\theta_{y_1}, LS = 0.5\theta_{y_1}, CP = 0.8\theta_{y_1}$$

换算成弯矩/屈服弯矩、转角/屈服转角,则

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

容许准则塑性转角/屈服转角分别对应于

IO = 0.151, LS = 0.302, 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。

問信达

弯矩转角数据对 32H1 - Interactir 编辑(F)	ng P-M2-M3	
·选择曲线 抽向力 -1098394	▶ 角度 90.	◆ 曲线 #37 【▲ ▶ ▶ 】 「単位 N, mm, C ▼
对选择曲线的弯矩转角数据		
Point Moment/Yield Mom A 0. B 1. C 1.12 D 0.2 E 0.2	Rotation/SF 0, 0, 3.3671 3.3671 5.0506	
注意:屈服点弯矩由相关面定》 夏制曲线数据	く 粘贴曲线数据	」 ▲ 当前曲线 ·曲线 #37 Force #3: Angle #5 二维面 電台面 第2
直接使用(IO) 生命安全(LS) 匠 防止坍塌(CP) □ 在当前曲线上显示功能は	0.2104 1.6835 2.5253	平面 315 轴向力 1098394 ▲ 标高 35 ▲ □ 腺藏骨干线 孔径角 0 ▲ □ 显示容许准则 30 BR MB3 MB2 ✓ 「加高当範囲线
弯矩转角信息 对称条件 轴力值数里 角度数里 曲线总数	None 3 16 48	角度是弯拒绕 0度 = 绕正 M2 袖 30度 = 绕正 M3 袖 180度 = 绕负 M2 袖 270度 = 绕负 M3 袖

图 70 弯矩转角数据对 32H1-Interacting P-M2-M3

表 7 钢柱 PMM 铰可接受准则

	Mode	Modeling Parameters			Acceptance Criteria					
	Plastic Rotation Residual Angle, Strength Radians Ratio		Plastic Rotation Angle, Radians							
			Strength Ratio		Primary		Secondary			
Component/Action	а	b	с	ю	LS	СР	LS	СР		
Columns—flexure 2,7										
For P/P _{CL} < 0.20										
a. $\frac{b_f}{2t_f} \le \frac{52}{\sqrt{F_{ye}}}$ and h = 300	90 _y	11θ _y	0.6	10y	6θy	89 _y	98 _y	110 _y		
$\frac{1}{t_w} \le \frac{1}{\sqrt{F_{ye}}}$										
b. $d \frac{b_f}{2t_f} \ge \frac{65}{\sqrt{F_{ye}}}$ or $\frac{h}{2} \ge \frac{460}{2}$	4θ _y	60y	0.2	0.250 _y	20y	Зθ _у	Зθ _у	4θ _y		
$\overline{t_w} = \sqrt{F_{ye}}$ c. Other	Linear inter	polation bet	ween the value	es on lines a	and b for bo	th flance sle	nderness (fir	st term) a		

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
$$a = 4\theta_{y_2}$$
, $b = 6\theta_{y_2}$, $c = 0.2$, $IO = 0.25\theta_{y_1}$, $LS = 2\theta_{y_1}$, $CP = 3\theta_{y_1}$

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

施	加的荷载——			
_	荷载类型	荷载名称	比例系数	
	Accel 🗾	UX 🔻	-1.	
	Load Pattern	UX	-1.	添加(A)
	Accel Mode			
ľ				修改(M)
				删除(D)

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

-Pushover参数:	名		□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	
名称	A40P01		KN, m, C	•
绘图轴			标签和范围	
	O Sa · T · O S	Sd-T	设置轴数据…	
需求谱定义一				
⊙ 函数	RSPF_R	-	SF 9.806	
○ 自定义系	数 Ca		Cv	_
阻尼参数定义			0.00	
固有 + 附加	昆尼		0.03	
結构性能类3 〇 A	₽ ● B ⊂ C	○ 用户	修改/显示 .	,
绘图中可见项				
☑ 显示能力	曲线		颜色 📙	
☑ 显示需求	谱族		颜色 📕	
阻尼比				
0.05	0.1	0.15	J0.2	
✓ 显示单一 (可)	·需求谱 (ADRS) 变阻尼)		颜色 📘	
☑ 显示常周	期线于		颜色	
0.5	1.	1.5	2.	
	1	重设默认颜色		

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 Ca、Cv 值。其近似关系如下所示:

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

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

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

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 ς =0.03,根据

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

$$C_{v} = \left(\frac{T_{g}}{T}\right)^{\gamma} \eta_{2} \alpha_{m} T_{x} = 0.47, \quad C_{a} = C_{v} / (2.5T_{g}) = 0.378$$

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, $\beta_{e\!f\!f}$ 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。

震动持续时间	新结构	现有结构	旧结构
短	А	В	С
K	В	С	С

表 8 结构行为类型

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