

北京金土木软件技术有限公司 编著

Pushover 分析

在建筑工程抗震设计中的 应用

中国建筑工业出版社

Pushover 分析在建筑工程抗震 设计中的应用

北京金土木软件技术有限公司 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

Pushover分析在建筑工程抗震设计中的应用/北京金土木
软件技术有限公司编著. —北京:中国建筑工业出版社, 2010
ISBN 978-7-112-11771-0

I. P… II. 北… III. 建筑工程—抗震设计: 计算机辅
助设计—应用软件, Pushover IV. TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 012470 号

本书全面地介绍了 Pushover 分析的理论背景以及 SAP2000、ETABS、PERFORM-3D 等软件的实现原理, 详细阐述 Pushover 分析方法在建筑工程抗震设计中的具体应用, 涉及结构构件的弹塑性分析模型选取、荷载模式的确定、分析控制模式、能力谱和需求谱的建立、性能点的确定、中国规范相关参数的转换、Pushover 分析不同方法的对比、工程应用中的具体注意事项等内容, 特别强调在实际工程的应用环节。

本书可供从事建筑结构工程抗震设计的工程师、科研人员及高等院校师生参考使用。

* * *

责任编辑: 刘瑞霞

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 王金珠 赵颖

Pushover 分析在建筑工程抗震设计中的应用

北京金土木软件技术有限公司 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京永峥排版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787 × 1092 毫米 1/16 印张: 11¼ 字数: 252 千字

2010 年 4 月第一版 2010 年 4 月第一次印刷

定价: 40.00 元

ISBN 978-7-112-11771-0

(19025)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码: 100037)

前 言

我国是一个地震灾害频发的国家，结构抗震工程历来受到工程实践和科学研究者的高度重视。结构工程设计理论与实践历经了“基于强度的设计”和“基于变形的设计”，虽然两者都还在工程设计中继续沿用，但其固有的缺陷（如针对地震工程的动力问题、脆性材料等）促使理论界和工程界在 20 世纪 90 年代开始了“基于性能的设计（Performance - Based Design）”的理论研究与工程实践探索。

虽然隐含着“满足设计规范就能够防止结构在强震中倒塌”，传统的设计规范并没有明确地建立结构的性能水准。基于性能的设计就是要对满足一定性能水准的设计提供可靠的保证。如何提供我国规范要求的“小震不坏、中震可修、大震不倒”（这与美国规范的三个重要性能水准基本一致：Immediate Occupancy [IO], Life Safety [LS], Collapse Prevention [CP]）的性能水准？主要步骤为：（1）选择恰当的性能设计水准和设计荷载；（2）定义结构的性能评价指标（如层间位移角、塑性铰转角、剪力指标等）；（3）取得变形和内力的限值（强度值和变形值可以通过规范或实验获得）；（4）通过结构分析的手段计算出变形和内力（通常需要非线性分析）；（5）求得需求/能力比（Demand/Capacity），如 $D/C > 1$ ，则要修改设计。

基于性能的设计对工程师提出了更高的要求，需要工程师对结构有更清晰的认识，需要工程师具备充分的理论素养、工程经验和计算分析能力等综合素质。

在基于性能的设计中，结构的某些构件是可以屈服的，而另一些构件必须处于弹性状态；如果我们不能够清晰地分辨构件应该所处的状态，只依靠计算分析来告诉我们——这是非常危险的——我们只能分析一个近似的“模型”，而不是实际结构。所以必须事先确定哪些构件能够屈服，而哪些必须处于弹性状态，这样我们就可以将可屈服构件设计成具有足够的延性，将弹性构件设计成具有足够的承载力。

结构动力分析一般都涉及对结构进行非线性分析，这是由其结构性能响应所决定的。结构的非线性包括材料非线性和几何非线性两大类，前者主要由于材料的屈服、开裂、压碎、滑移、摩擦等所致，通常都是非弹性行为；后者是由结构形状变化所致，包括 $P-\Delta$ 效应、大位移等。相对而言，材料非线性更为复杂。由于涉及众多难以确定的因素，非线性分析比线性分析更加复杂和困难，非线性分析的目的并不是要得到“精确的”结构行为预测（理论上讲，这是不可能的），而是要提供给设计有用的信息（毫无疑问这是可行的）。既然线性分析也与实际情况相去甚远，却能够为设计提供有用的信息，那么我们就应该为非线性分析确定这个相同的标准。非线性分析更困难，但更合理，它可以提供比线性分析更好的信息，以支持设计决策。

结构分析并不是其终点，它是用于设计的一种工具，其目标并不是要获得一个“精确

的”结构模拟，这对真实结构是不可能的事情；结构分析的真正目的在于，获得一个精度足够的、可用于设计决策的需求/能力比。

结构抗震工程的非线性分析一般采用非线性静力分析和非线性动力分析，Pushover 分析属于前者，后者指动力弹塑性时程分析。这两种分析方法各具优势，我们建议在条件允许的情况下，同时考虑两种方法来进行对比印证。本书主要讲解 Pushover 分析方法，相对于动力弹塑性时程分析，它的主要优势在于：（1）采用了设计反应谱而不是一系列的地震时程记录；（2）静力分析模型比动力分析模型要简单得多；（3）计算分析时间要少得多。然而，Pushover 分析是近似的，它使用了静力分析来代表动力荷载和往复变形，而且由于理论上的原因，对于高度较大和复杂的结构，Pushover 分析的结果不太理想。但由于采用了清晰直观的设计原理和简单易行的操作方法，Pushover 分析在工程实践中得到了较为广泛的应用。

鉴于此，我们组织编写了本书，希望能够通过对 Pushover 分析理论背景的全面阐述、软件实现的原理和方法介绍、实际工程应用的深入解剖，来为急迫想掌握此方法并勇于在工程实践中应用此方法的广大工程师提供参考素材，达到抛砖引玉之目的，以尽我们绵薄之力。

本书除了 Pushover 分析理论脉络的梳理之外，尽量做到与相关软件应用和实际工程案例的结合，分别介绍了 Pushover 分析在 SAP2000、ETABS 和 PERFORM-3D 的应用情况，希望能够对读者理解和掌握相关软件有所帮助。

全书一共 6 章，作者团队由富有经验的结构软件技术支持工程师及设计院中承担过重大项目的结构设计的工程师组成。第 1 章由李立编写，第 2 章由张洪伟编写，第 3 章由武秀莹编写，第 4 章由苏志彬、武秀莹编写，第 5 章由郑竹（深圳华森建筑与工程设计顾问有限公司）编写，第 6 章由陈勤（清华大学深圳研究生院）编写。李立负责全书的统稿工作，刘春明和李楚舒负责全书的审定工作。在本书编写过程中得到了中国建筑工业出版社刘瑞霞编辑的鼓励和支持。

由于水平有限，书中难免有缺点和错误之处，恳请广大读者批评指正，也欢迎业内同行登录网站（www.bjcks.com）或来函探讨（info@bjcks.com）。

北京金土木软件技术有限公司

2009 年 10 月

目 录

第 1 章 Pushover 分析的原理和实现方法	1
1.1 概述	1
1.1.1 结构性能的检查方法	1
1.1.2 Pushover 分析的基本思路	2
1.2 建立 Pushover 曲线	3
1.2.1 建立结构模型	3
1.2.2 确定荷载模式	7
1.2.3 分析控制	8
1.3 能力谱方法	9
1.3.1 建立能力谱和需求谱	9
1.3.2 需求谱折减	11
1.3.3 求取性能点	13
1.3.4 与中国规范反应谱相关的参数转换	14
1.3.5 能力评价	14
1.4 目标位移法	15
1.5 其他方法及对比	17
1.5.1 FEMA440 等效线性化	17
1.5.2 FEMA440 位移修正	19
1.5.3 方法对比	20
1.6 Pushover 分析注意事项	21
1.7 Pushover 分析与动力弹塑性时程分析	23
1.8 小结	24
参考文献	24
第 2 章 Pushover 分析在 SAP2000 中的实现	26
2.1 SAP2000 中的实现步骤	26
2.2 框架塑性铰的定义	27
2.2.1 默认铰属性	27
2.2.2 自定义铰属性	29
2.2.3 塑性铰属性的指定	33
2.3 墙元塑性行为的定义	34
2.3.1 分层壳模型的定义步骤	34

2.3.2	材料非线性属性定义	34
2.3.3	分层壳定义	37
2.3.4	非线性剪力墙分层壳模型	39
2.4	Pushover 工况的定义	40
2.4.1	荷载施加控制	41
2.4.2	分析控制参数	42
2.5	Pushover 分析结果的查看	46
2.5.1	基底剪力 - 监测点位移曲线	46
2.5.2	Pushover 曲线	49
2.5.3	显示铰结果	54
2.5.4	分层壳结果输出	55
2.6	Pushover 分析例题	58
2.7	小结	67
	参考文献	67
第3章	Pushover 分析在 ETABS 中的实现	69
3.1	一般过程	69
3.2	框架塑性铰定义	69
3.2.1	默认铰属性	70
3.2.2	框架铰属性数据定义	72
3.3	剪力墙等代柱	74
3.3.1	整截面剪力墙、整体小开口剪力墙等代	74
3.3.2	双肢剪力墙及多肢剪力墙等代	75
3.3.3	壁式框架的等代	76
3.4	非线性铰的指定	77
3.5	Pushover 工况的定义	78
3.6	运行静力非线性分析	81
3.7	结果查看	81
3.8	分析注意事项	82
3.9	例题	82
3.10	小结	91
	参考文献	91
第4章	Pushover 分析在 PERFORM-3D 中的实现	93
4.1	PERFORM-3D 简介	93
4.2	一般过程	93
4.3	节点的绘制及指定	94
4.4	结构构件定义	94
4.4.1	梁构件的模拟	95
4.4.2	剪力墙构件的模拟	99

4.5 构件绘制	106
4.6 荷载定义及指定	108
4.7 Pushover 分析在 PERFORM-3D 中的实现	108
4.7.1 求解过程中的位移控制和力控制问题	108
4.7.2 非线性求解的策略	109
4.7.3 可靠性和效率问题	110
4.7.4 控制位移	110
4.7.5 PERFORM-3D 中需要人为指定的参数	110
4.8 结果查看	111
4.9 PERFORM-3D 例题	111
4.9.1 实例简介	111
4.9.2 节点绘制及指定	112
4.9.3 构件定义	112
4.9.4 构件绘制	119
4.9.5 定义层间位移角及层间位移	120
4.9.6 荷载工况	120
4.9.7 运行分析	121
4.9.8 分析结果查看	122
4.9.9 能量分布图结果查看	122
4.9.10 PUSH-OVER 结果显示	123
4.10 动力弹塑性时程分析方法实现简介	124
4.10.1 滞回环	124
4.10.2 阻尼	124
4.10.3 时程积分	125
4.11 小结	127
参考文献	127
第 5 章 ETABS 工程应用实例及分析报告制作	128
5.1 概述	128
5.2 利用 ETABS 进行 Pushover 分析的主要目的	128
5.3 ETABS 静力 Pushover 分析的主要参数及设置	129
5.3.1 构件本构关系及参数设置	129
5.3.2 其他参数设置	133
5.4 ETABS 静力推覆的工程应用实例	135
5.4.1 超限框架结构的应用	135
5.4.2 超高层框-筒结构的应用——深圳卓越皇岗世纪中心	140
5.5 ETABS 静力弹塑性推覆分析报告的制作方法	146
5.5.1 分析目的	147
5.5.2 分析方法	147

5.5.3 分析过程	147
5.5.4 分析结果	147
5.5.5 结论	148
5.6 结论与展望	148
参考文献	149
第6章 PERFORM-3D 工程应用实例	150
6.1 Perform-3D 的计算模型	150
6.1.1 框架单元计算模型	151
6.1.2 平面单元计算模型	152
6.1.3 剪力墙计算模型	152
6.1.4 常规墙模型	153
6.1.5 连梁计算模型	154
6.2 Perform-3D 的弹塑性分析方法	156
6.2.1 Pushover 分析	156
6.2.2 弹塑性时程反应分析	157
6.3 Perform-3D 的弹塑性分析的工程应用实例	158
6.3.1 工程概况	158
6.3.2 材料本构模型	159
6.3.3 静力推覆结果分析	160
6.3.4 动力地震反应结果分析	162
6.3.5 结论	167
6.4 小结	168
参考文献	168

第 1 章

Pushover 分析的原理和实现方法

1.1 概述

现代抗震设计理论从 20 世纪初开始建立, 经历了一个世纪的发展, 随着人们对地震特性和结构动力特性理解的不断深入, 结构抗震设计理论从最初的静力阶段和反应谱阶段, 发展到动力阶段及目前的基于性能的抗震设计理论阶段。基于性能的抗震设计是建筑结构抗震设计的一个新的重要发展, 它的特点是: 使抗震设计从宏观定性的目标向具体量化的多重目标过渡, 业主 (设计者) 可选择所需的性能目标; 抗震设计中更强调实施性能目标的深入分析和论证。有利于针对不同设防烈度、场地条件及建筑的重要性采用不同的性能目标和抗震措施, 有利于建筑结构的创新。基于性能的抗震设计理论是抗震设计理论的一次重大变革, 是一种发展方向。

作为抗震性能分析的重要方法之一, Pushover 分析将非线性静力计算结果与弹性反应谱紧密结合起来, 用静力分析的方法来预测结构在地震作用下的动力反应和抗震性能, 在基于性能的抗震设计中, 得到了广泛的研究与应用。

1.1.1 结构性能的检查方法

为了分析建筑结构在给定水准地震作用下的性能, 可以采用的分析方法有: 静力弹性分析、动力弹性分析、非线性静力弹塑性分析、非线性动力弹塑性分析。前面两类分析方法是目前广泛采用的、简便而易于实施的分析方法, 比如我国规范中详细规定的底部剪力法、振型分解反应谱法及弹性时程分析方法。然而, 这些常规的分析方法无法反映建筑结构在强震作用下的弹塑性受力性能。于是, 非线性弹塑性分析相关理论的研究引起了广大科研工作者的重视。

非线性动力弹塑性分析, 比如动力弹塑性时程分析, 虽然被认为是一种非常可靠的方法, 但由于其分析技术复杂、计算工作量大, 通常用于理论研究中, 在工程界的应用尚不普及。不过, 一些优秀的抗震性能评估软件, 比如 Perform-3D, 已实现将这一复杂分析技术应用于工程实践。本书的相关章节将介绍这方面的内容。

非线性静力弹塑性分析, 即 Pushover 分析, 是近年来较为流行的结构抗震性能评估方法, 也是本书介绍的重点。Pushover 分析的优点在于: 既能对结构在多遇地震下的弹性设计进行校核, 也能够确定结构在罕遇地震下潜在的破坏机制, 找到相应的薄弱环节, 从而使设计者可以对局部薄弱环节进行修复和加强, 使整体结构达到预定的使用功能。

1.1.2 Pushover 分析的基本思路

首先, 我们应明确使用 Pushover 分析的目的是对建筑结构的抗震性能进行检查或评估, 目标是预测结构和构件在给定地震作用下的峰值响应。我们可通过结构的荷载-位移曲线 (Pushover 曲线) 来描述在侧向力作用下, 结构变形从弹性到弹塑性发展的不同阶段。如图 1-1 所示, 荷载-位移曲线上的不同位置代表不同的性能控制点, 通过在给定荷载作用下结构的期望性能点所在的位置, 来判断结构的抗震能力是否达到要求。因而, Pushover 分析可以考虑结构在设计地震作用下的非线性行为, 明确结构中的薄弱部位, 预测构件能力需求, 使我们能够更好地理解结构行为, 采用更合理的而非保守的抗震性能目标。

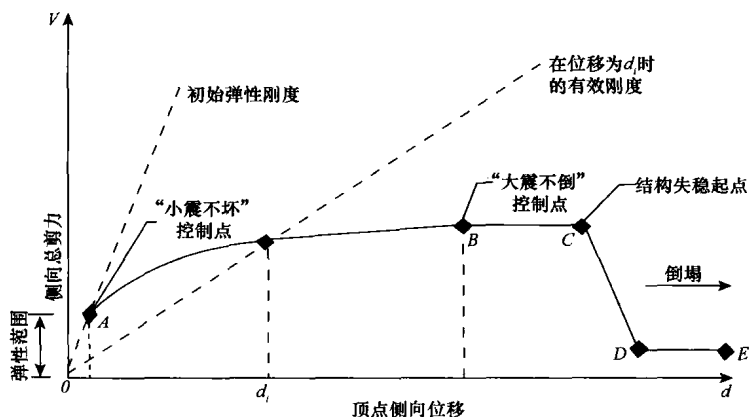


图 1-1 结构荷载-位移曲线

通过 Pushover 分析进行结构抗震性能评估的基本思路如下:

- (1) 建立 Pushover 曲线;
- (2) 选择用于评估的地震水准;
- (3) 选择用于评估的性能水准;
- (4) 为各个性能水准确定容许准则;
- (5) 采用特定的方法进行结构抗震能力评估。

主要有 ATC 40 采用的“能力谱法”; FEMA 356 推荐的“目标位移法”; FEMA 440 基于更多研究和实践的成果对上述两种方法进行了改进, 提出了“等效线性化”和“位移修正”两种方法。CSI 系列软件提供了多种选项对应于这些计算方法, 用户可根据需要自行选择。目前, 在我国“能力谱法”被广泛采用, 本章将详细介绍“能力谱法”, 同时也会介绍其他几种计算方法。

除非特别指明, 本章阐述的理论方法均适用于本书涉及三个程序: SAP2000、ETABS 和 Perform-3D。

1.2 建立 Pushover 曲线

Pushover 曲线, 即结构的荷载-位移曲线, 通常表示为侧向总剪力与顶点侧向位移的关系。它的确定需要综合结构计算模型; 加载模式; 构件的实际承载力; 构件的弹性、开裂和屈曲后刚度等多种因素。建立 Pushover 曲线一般需经历 4 步: (1) 建立结构模型, 确定构件的力-变形关系; (2) 确定荷载模式, 施加重力荷载及侧向荷载; (3) 选择控制位移; (4) 运行 Pushover 分析。

1.2.1 建立结构模型

用于 Pushover 分析的结构模型, 应该充分体现结构行为的三维特征, 包括质量分布、强度、刚度以及各个方向的变形能力。因此, 应该了解结构中影响其质量、强度、刚度和变形能力的关键部位或构件, 结构模型中应充分反映这些构件的力学行为, 比如那些承受重力荷载及侧向荷载的主要受力构件。而一些对结构性能影响甚微的构件可以不被包括在结构模型中, 比如那些在早期阶段就允许破坏的次要构件。但是, 有些次要构件或非结构构件的破坏会显著改变结构的刚度和强度, 影响结构性能, 在建立结构模型时不可被忽视。

如何模拟构件的屈服和屈服后行为是建立结构模型的关键内容。对于框架单元, 通过塑性铰来模拟。根据杆件的受力特点, 一般地, 对桁架定义轴力铰; 对梁定义主方向的弯矩铰和剪力铰; 对柱定义 PMM 相关铰。对于剪力墙, 不同的软件有不同的模拟方法: SAP2000V14 利用分层非线性壳单元模拟剪力墙的弹塑性行为; ETABS 目前只可在框架单元中引入塑性铰, 故需要先将剪力墙等效转换为框架; Perform-3D 主要利用纤维截面和等效剪变模量来分别模拟剪力墙的 P-M 相关性和剪切效应。

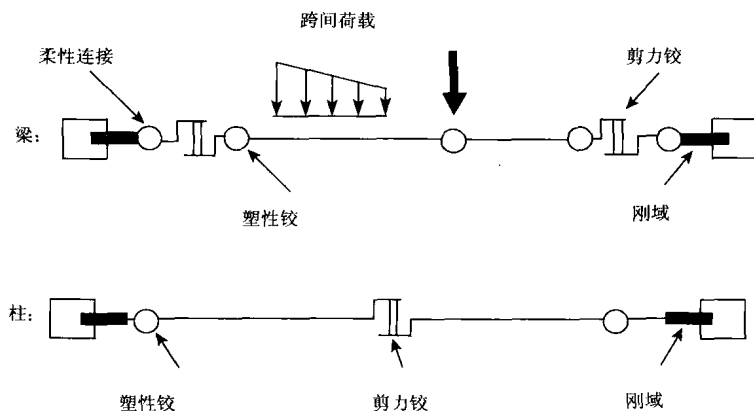


图 1-2 带塑性铰的框架梁和框架柱单元简化模型

1. 杆件单元模型

程序中常采用离散的塑性铰来模拟杆件的非线性行为, 它们可以被指定到杆件的任意位置, 允许使用非耦合弯矩、扭矩、轴力和剪力铰, 还有基于铰位置轴力和弯矩相互作用

的 P-M2-M3 耦合铰。在同一位置可以有不止一种类型的铰。例如，梁单元的同端可以同时存在一个弯矩铰和一个剪力铰。

(1) 塑性铰的属性和长度

一个铰属性是一组命名的刚性-塑性属性，可被指定给一个或多个框架单元。可指定所需的铰的属性。对每一个自由度（轴向和剪切），可指定塑性的力-位移性能。对每个弯矩自由度（弯曲和扭转），可指定塑性弯矩-转动性能。每个铰属性可以具有对六个自由度中任意数目指定的塑性属性。轴力和两个弯矩可通过一个相关作用面来耦合。未进行指定的自由度保持弹性。

每个塑性铰用一个离散点铰来模拟。所有塑性变形，无论是位移或转动，都发生在点铰内。这意味着需为铰假定一长度，在此长度上对塑性应变或塑性曲率积分。

虽然在 FEMA 356 中给出了指导，但没有简单方法来选择此长度。一般地，它是单元长度的一个分数，且经常与截面高度具有同一数量级，特别对弯曲-转动铰。

可通过插入许多铰来近似模拟沿单元长度分布的塑性。例如，在单元内的相对位置插入 10 个铰，0.05, 0.15, 0.25, ……，0.95，每个铰具有基于假定 1/10 单元长度的铰长度的变形属性。显然，添加更多的铰会增加计算量，而且如果它们实际上没有屈服，这样做的效果也不显著。所以，塑性铰的位置，通常设置在弹性阶段内力最大处，因为这些位置最先达到屈服。

(2) 塑性铰的力-位移曲线

对每一自由度，定义一个用来给出屈服值和屈服后塑性变形的力-位移（弯矩-转角）曲线。这通过一个有五个控制点 A-B-C-D-E 的曲线来实现，如图 1-3 所示，即弹性段（AB）、强化段（BC）、卸载段（CD）、塑性段（DE）。该曲线可指定为一个对称曲线，或在正和负方向分别定义不同的曲线。注意在点 A 和 B 间铰内没有变形发生，即铰屈服前被假定为刚性的。所有弹性变形在框架单元内发生。点 B 代表铰的屈服，需要输入屈服力和屈服位移，相应的值可以自定义也可由程序计算。当铰到达点 C 指示的点时，开始失去承载力。点 IO、LS 和 CP 代表铰的能力水平，它们分别对应于“直接使用（Immediate Occupancy）”、“生命安全（Life Safety）”和“防止倒塌（Collapse Prevention）”。在任何 Pushover 分析后，应查看当结构位移至其性能点时各铰的变形量，来判定结构是否满足指定地震作用下的结构期望的能力目标。确定 C、D、E 各点的横、纵坐标时需要分别按力、位移与屈服力和屈服位移的比值来输入。这些值可以自定义也可采用默认铰的方式由程序计算。

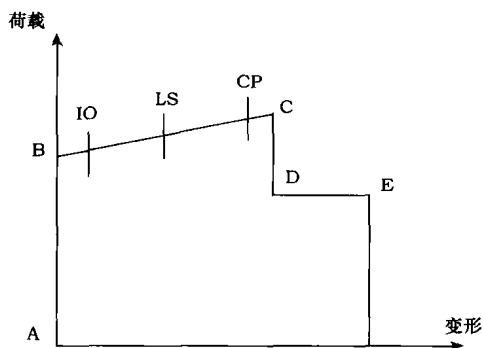


图 1-3 塑性铰的力-位移曲线（弯矩-转角曲线）

所有弹性变形在框架单元内发生。点 B 代表铰的屈服，需要输入屈服力和屈服位移，相应的值可以自定义也可由程序计算。当铰到达点 C 指示的点时，开始失去承载力。点 IO、LS 和 CP 代表铰的能力水平，它们分别对应于“直接使用（Immediate Occupancy）”、“生命安全（Life Safety）”和“防止倒塌（Collapse Prevention）”。在任何 Pushover 分析后，应查看当结构位移至其性能点时各铰的变形量，来判定结构是否满足指定地震作用下的结构期望的能力目标。确定 C、D、E 各点的横、纵坐标时需要分别按力、位移与屈服力和屈服位移的比值来输入。这些值可以自定义也可采用默认铰的方式由程序计算。

(3) 塑性铰的耦合作用

一般地，铰属性对 6 个自由度的每一个都是不耦合的。但是，可选择指定耦合的轴力/双轴弯矩行为，这被称作 P-M2-M3 或 PMM 铰。通常程序默认拉力为正，压力为负。

对于 PMM 铰，在三维 P - M_2 - M_3 空间指定一个相关（屈服）面，如图 1-4 所示，来代表对轴力 P 、次弯矩 M_2 和主弯矩 M_3 的不同组合最先发生屈服的位置。可直接定义相关面，或让程序使用默认公式计算。

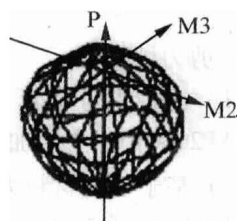


图 1-4 PMM 铰的相关曲面

定义 PMM 曲面，实质是定义一组 P - M_2 - M_3 曲线，每条曲线具有相同数量的点，点按照从最大负值（压）到最大正值（拉）的顺序排列，所有曲线第一个点的 P 、 M_2 和 M_3 值必须相同，最后一个点也是如此。注意：PMM 曲面必须为凸面。若定义一个非凸面的表面，则程序将自动增加所有“凹陷”点的半径，直至它们的切面在此面外。这在分析时会有一警告信息。

(4) 纤维模型

除了使用塑性铰模型模拟杆件的塑性行为，还可以使用纤维模型。纤维模型，基于平截面假定，将杆件的内力-变形关系转化成混凝土与钢筋的应力-应变关系。

在 SAP2000 中可以定义纤维 P - M_2 - M_3 （纤维 PMM）铰模拟分布贯穿框架单元截面一定数量的代表性轴向“纤维”的轴向性能。每个纤维具有一个位置、附属面积和应力应变曲线。轴向应力在整个截面积分，计算出 P 、 M_2 和 M_3 的值，同样地，用轴向变形 U_1 和转动 R_2 和 R_3 来计算纤维的轴向应力。如图 1-5 所示。

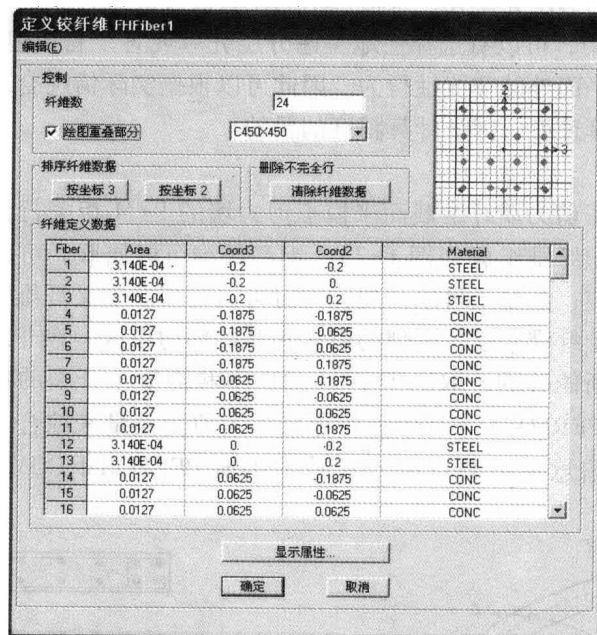


图 1-5 SAP2000 纤维铰定义

Perform-3D 提供了两种典型的纤维截面分别用于定义梁截面和柱截面。梁截面纤维可考虑轴力和面内弯矩的非线性行为（面外弯矩为弹性）；柱截面纤维可考虑轴力和两个方向弯矩的相关行为，即 PMM 相关。若框架受剪力较大，需加入剪切铰模拟非线性剪切

变形。

2. 剪力墙模型

(1) 非线性分层壳

SAP2000V14 中增加了用于模拟剪力墙非线性行为的单元——非线性分层壳单元。分层壳单元基于复合材料力学原理, 将一个壳单元分成多层 (如图 1-6 所示), 每层根据需要设置不同的厚度和材料, 材料一般包括钢筋或者混凝土等。在有限元计算时, 首先得到壳单元中心层的应变和曲率, 然后根据壳单元各层材料在厚度方向满足平截面假定, 由中心层应变和曲率得到各钢筋和混凝土层的应变, 进而由材料本构方程可以得到相应的应力, 积分得到整个壳单元的内力。分层壳单元考虑了面内弯曲一面内剪切一面外弯曲之间的耦合作用, 比较全面地反映了壳体结构的力学性能。文献 [11~13] 中, 分层壳模型计算和实际结构试验进行了大量对比, 表明了分层壳模型在分析剪力墙结构时具有很高的精度和实用性。另外壳的平面外性能受分层壳的层数影响, 层数越多, 计算结果越精确, 文献 [12] 对其精度与层数的关系进行了详细研究。

钢筋混凝土剪力墙通常由若干混凝土层和钢筋层构成。在 SAP2000 中, 钢筋是单轴材料, 通过指定材料角来描述钢筋的分布方向, 钢筋层的厚度通过将实配钢筋均匀“弥散”到一层的原理来换算。对于混凝土材料, 可以选择 Mander 模型来考虑箍筋的影响, 用于模拟墙体端部的约束混凝土。因此, 根据剪力墙厚度、配筋量、钢筋分布方式、材料等级的不同可以定义不同的分层壳单元, 来模拟不同位置的墙肢或连梁的非线性行为。值得一提的是, 在 SAP2000 中, 可以有选择性地考虑分层壳单元各个自由度方向的非线性行为, 以及有选择性地考虑平面外的非线性行为。因此可以根据实际情况合理简化剪力墙的分层壳模型, 达到加快运算速度, 保证计算精度的目的。

(2) 纤维截面

Perform-3D 提供了剪力墙纤维截面来模拟剪力墙的 P-M 相关行为。钢筋混凝土剪力墙由钢筋纤维和混凝土纤维组成 (图 1-7)。钢筋纤维可以屈服, 可以模拟钢筋纤维屈服后的刚度滞回退化效应; 混凝土可以开裂, 同时可以滑移。定义纤维截面时可以采用约束混凝土与非约束混凝土纤维来模拟端部约束区和非端部约束区。在非线形分析中, 截面的中性轴是变化的, 不断偏移的, 取决于 P/M 的比率和混凝土开裂的数量和滑移。对于剪力墙的剪切行为, 在 PERFORM-3D 中需要定义等效剪变模量来综合考虑混凝土和钢筋的共同作用。更详细的信息参见 Perform-3D 技术手册 PERFORM COMPONENTS AND ELEMENTS。

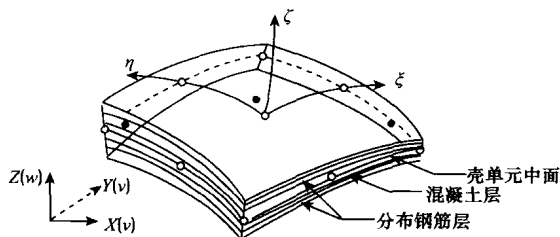


图 1-6 分层壳单元

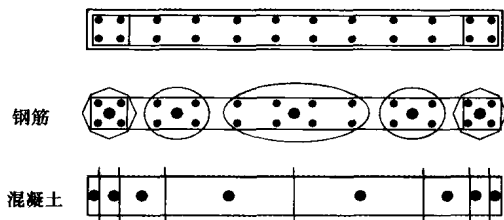


图 1-7 剪力墙纤维截面

(3) 等效框架模型

由于早期版本的 SAP2000 以及目前的 ETABS 程序中, 只提供了杆件单元的塑性铰模型, 没有壳面的弹塑性模型, 对于含剪力墙结构的 Pushover 分析需要用等效框架代替剪力墙。按照性能等效、内力等效的原则, 将墙体等效为框架, 并加上塑性铰来模拟剪力墙的塑性行为。许多科研人员、工程人员就该问题展开了广泛深入的讨论, 并提出了多种等效模型。比如, 文献 [14] 提出的“刚性柱-刚性梁-斜撑-链杆”模型; 文献 [15] 提出的“修正的多垂直杆模型”; 文献 [16]、[17] 提出的“等效柱”模型 (图 1-8) 等。这些模型已被运用于工程实践中, 为实现带有剪力墙结构的抗震性能评估进行了有益的尝试。当然, 等效框架模型是在没有更完善的理论和程序支持的前提下探寻的解决办法, 随着理论研究和计算方法的不断完善, 成熟的壳面弹塑性模型会成为更多工程人员的首选, 被广泛运用于实际工程当中。

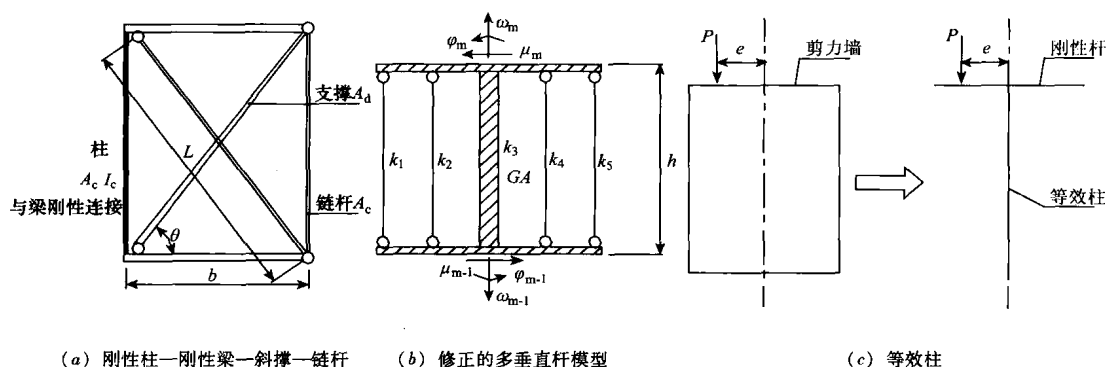


图 1-8 剪力墙等效模型

1.2.2 确定荷载模式

进行 Pushover 分析时, 首先要给结构施加重力荷载 (通常为重力荷载代表值), 再施加侧向荷载。在程序中的实现方式为, 先运行重力荷载作用下的非线性分析工况, 将其终点刚度设为 Pushover 分析的初始条件, 再运行 Pushover 分析。

侧向荷载的分布代表在设计地震作用下结构层惯性力的分布, 侧向荷载的分布模式直接影响 Pushover 的分析结果, 因此侧向荷载模式的选取是 Pushover 分析中的一个关键问题。一般地, 将侧向荷载定义为下面一个或多个的比例组合: (1) 自定义的静荷载工况或组合。比如定义均匀或倒三角形分布的静力荷载工况, 然后使用此静力荷载工况作为侧向荷载的分布。(2) 加速度荷载。作用于任意的整体 X 、 Y 、 Z 方向的均匀加速度。在每一节点的力与分配给节点的质量成比例, 且作用在指定的方向。(3) 振型荷载。选取任意一个振型, 每一节点的力与振型位移、振型角频率平方及分配给节点的质量成比例。力作用于振型位移方向。通常情况下, 加速度荷载相当于均匀分布侧向荷载, 振型荷载 (第一振型) 相当于倒三角分布侧向荷载。

事实上, 任何一种侧向力分布模式都不可能反映结构全部的变形和受力要求。所以, 应考虑使用两种以上的侧向荷载模式进行计算。对于空间结构, 还应考虑荷载作用的方

向；对于非对称结构，在正和负方向作用结构可能产生不同的结果。常用的 Pushover 工况有：(1) 重力 + 振型 1（纵向）；(2) 重力 + 振型 2（横向）；(3) 重力 + x 向加速度；(4) 重力 + y 向加速度。此外，若需要采用 SRSS 侧向分布模式，即按反应谱振型组合得到的惯性力分布，可先将反应谱工况得到的层剪力指定为一静荷载工况施加于结构上，再使用该静荷载工况作为侧向荷载即可。

1.2.3 分析控制

在 Pushover 分析中，指定的荷载模式成比例地施加给结构。荷载模式的初始乘数为零，随着 Pushover 分析的进行，此乘数逐步增加，直至荷载值或位移值到达预先指定的数值，也可能直至结构失效而不能继续承受附加的荷载。Pushover 分析中施加在结构上的荷载有两种控制方法：荷载控制和位移控制。

荷载控制，又称力控制，代表每一步荷载施加的增量为定值（图 1-9）。例如，假定当前施加给结构的力为 150kN。在力控制时，可控制每一步荷载增量为 30kN，按指定模式逐步施加于结构。若施加的荷载超过结构的承载力，即结构因材料屈服或失效，或几何不稳定而不能承受指定荷载，Pushover 分析将停止，这时非线性分析将得不到收敛的解。

位移控制，代表每一步分析得到的位移增量为定值，侧向荷载的分布模式一定，其大小通过位移值反算得到（图 1-9）。例如，假定结构监控点的当前位移为 3cm。进行位移控制时，程序可简单地添加 1cm 的增量至此位移，来得到 4cm 的总位移。然后程序估计得到此位移所需的力，并施加此力于结构。因为在此荷载增加过程中可能发生结构的屈服或失效，程序可进行试算和迭代来找到产生期望位移增量的荷载。若结构不稳定，则荷载增量可能为负。虽然随着结构承载力的变化，所施加荷载可以增加或减少，预先存在的荷载（如重力）不会改变。若结构失去重力承载力，Pushover 分析在到达目标位移前将停止。

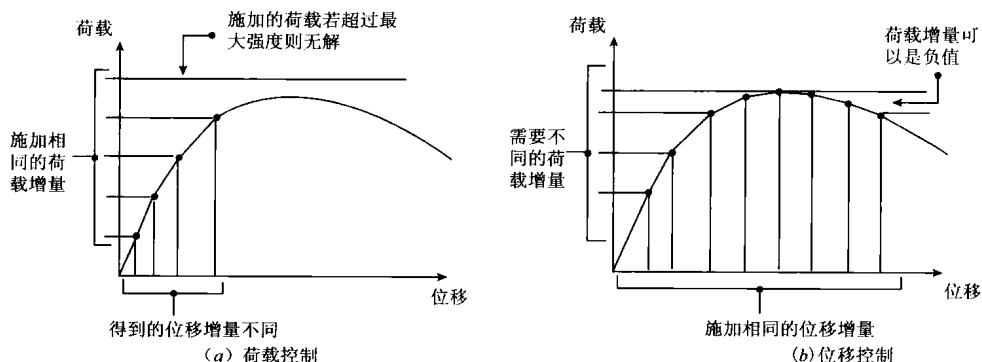


图 1-9 荷载控制与位移控制

使用位移控制时，需要定义监测的点及其自由度位移分量。应选择一个对施加的荷载敏感的监测位移。例如，当荷载作用在方向 UY 上的时候，通常不应该监测自由度 UX 。同样不应监测靠近约束的节点。如果可能，监测位移在分析过程中最好是单调增加的。所指定的监测位移将用来设置位移目标，即结构应移动多远。推荐使用耦合位移，对分析的收敛有帮助。耦合位移通常是在一个给定的指定荷载下，对结构中最敏感位移的测量。它