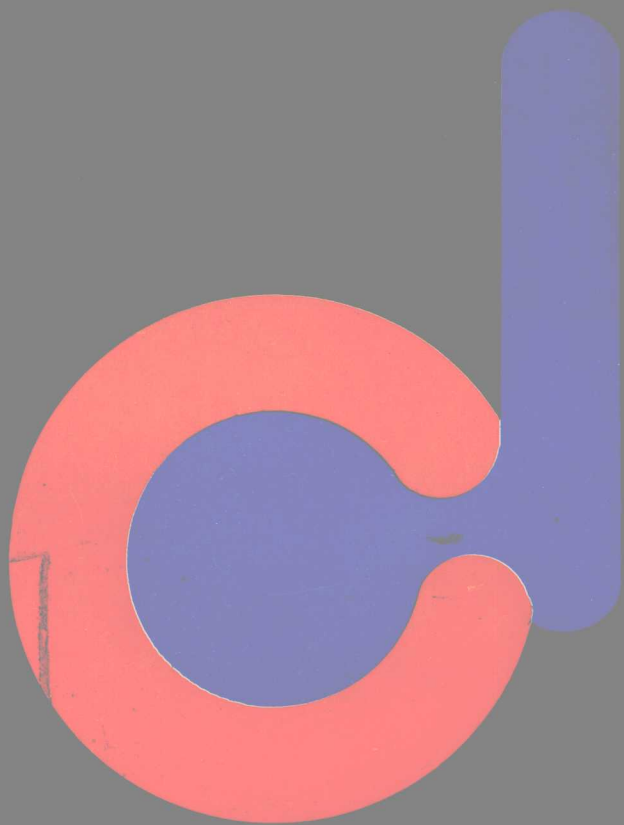


孙焕纯 曲乃泗 林家浩 编著

高等计算结构动力学



大连理工大学出版社

高等计算结构动力学

孙焕纯

曲乃泗

林家浩

编著

大连理工大学出版社

(辽)新登字 16 号

内 容 提 要

本书着重阐述弹塑性结构动力分析问题及其逐步积分分解的理论和方法、线弹性复杂结构动力分析中更为精确和实用的计算方法、以及动力稳定分析厚板、厚壳等的动力分析方法。大部分内容都是从作者们多年来结合工程实际所进行的科研成果和深入研究中提炼出来的。尽可能从理论到方法进行详细地阐述,力求易懂,并附有若干电算例题。

本书可做力学、土建、机械、航空、船舶等专业的大学生和研究生以及科研工作者和工程技术人员的参考书。

高等计算结构动力学

Gaodeng Jisuan Jiegou Donglixue

孙焕纯 曲乃泗 林家浩 编著

大连理工大学出版社出版发行 邮政编码: 116024

大连理工大学印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 7½ 字数: 192 千字

1992 年 4 月第 1 版

1992 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1—1500

责任编辑: 卢平晶

韩露

封面设计: 姜延军

责任校对: 玉洁

ISBN 7-5611-0607-6/O · 87

定价: 2.58 元

前 言

《计算结构动力学》(高等教育出版社, 1989. 2)是作者于 1985 年共同编著的《计算结构动力学》讲义的上、中两册, 本书则是其下册, 此次出版对原讲义做了若干增删。由于内容及出版单位不同, 则将本书命名为“高等计算结构动力学”。《计算结构动力学》着重阐述线弹性结构动力学的基本理论以及一些有用的手算和电算方法。本书第一章则着重阐述更复杂的弹塑性结构动力问题以及相应的解法——逐步积分法的理论和各种方法, 还有框架结构动力分析的精确解法; 第二章则针对以往线弹性结构动力分析中的一些考虑不够精细或方法的精度不高问题而编写的, 如修正振型迭加法; 动力分析中的局部效应和鞭梢效应; 动力计算的误差分析; 动力稳定分析以及深梁、厚板、厚壳的动力分析等; 第三章是针对海洋平台和高层建筑等复杂结构, 提出实用的动力分析方法。

本书的这些内容都是作者从多年来结合工程实际问题所进行的科研工作的总结中更进一步的提炼、深入研究的结果。本书中所列的许多算例都是由电算程序算出的。本书并不追求理论系统的完整, 只能说是对以往结构动力学中的某些问题做了些拾遗补缺的工作。限于作者的水平, 难免有所疏误, 谨向对这些问题有兴趣的读者提供一些参考的资料, 同时恳求各位前辈、专家和读者不吝赐教。

本书第一、二、三章分别由孙焕纯、曲乃泗、林家浩执笔。

作 者

1991 年 7 月

目 录

第一章 建筑结构的弹塑性动力反应分析	1
绪论.....	1
第一节 建筑结构的力学模型.....	3
第二节 构件及结构的恢复力特性曲线——滞回曲线.....	9
第三节 构件或结构的弹塑性单元刚度阵	21
第四节 逐步积分法	25
第五节 多自由度结构的弹塑性地震反应分析举例	52
第六节 框架结构动力计算的精确解法	86
第七节 框架结构的串联多自由度简化体系的等效刚度参数识别法	96
第二章 工程结构的动力、抗震分析	111
第一节 多自由度结构的动力分析.....	111
第二节 修正振型迭加法.....	114
第三节 动力、抗震分析中的局部效应	120
第四节 质量约化概念在振动中的应用.....	131
第五节 动力、抗震计算的误差分析	136
第六节 振动中的鞭梢效应.....	141
第七节 <i>Ritz</i> 向量法在振动分析中的应用	149
第八节 动力、稳定分析	160
第九节 深梁、厚板、厚壳动力分析.....	167
第三章 复杂工程结构动力分析	198

第一节	基于多重子结构的自振特性分析.....	198
第二节	复杂结构简谐振动分析.....	203
第三节	三维结构反应谱法抗震分析.....	206
第四节	平稳随机地震响应快速算法.....	210
第五节	海洋平台对线性不规则波浪的随机响应.....	217
参考文献	.....	223

1	.....	章一第
5	.....	章一第
9	.....	章二第
15	.....	章三第
25	.....	章四第
32	.....	章五第
38	.....	章六第
48	.....	章七第
111	.....	章二第
114	.....	章一第
117	.....	章二第
120	.....	章三第
131	.....	章四第
136	.....	章五第
144	.....	章六第
151	.....	章七第
161	.....	章八第
181	.....	章九第
186	.....	章三第

第一章 建筑结构的弹塑性动力反应分析

绪 论

50年代以前,分析结构物对外力及其它因素作用的反应时,都是以弹性理论为基础的。然而从40年代开始,由于对结构构件极限强度的试验研究增多,出现破损阶段的设计方法,采用以材料平均强度为基础的经验的安全系数。后来随着对荷载和材料变异性的研究,认识到结构在使用期限内作用力以及结构的承载能力都非确定值,进而在50年代提出了极限状态的设计方法;另一方面在研究结构物的抗震性能时,认识到使建筑物在经常遇到的中、小地震时不发生破损(处于弹性状态),而在偶然遇到的强烈地震时不发生倒塌,即所谓裂而不倒(处于塑性状态)是比较合理的、经济的。这就要求以弹塑性理论为基础,对结构物在外力及其它因素作用下的反应进行弹塑性分析。

众所周知,分析结构物对外力等的弹性反应时,通常假设阻尼矩阵符合比例阻尼的假定,采用逐步积分法求解。但当参振的振型数很多,或给定干扰力的时间历程的情况下,为了避免求很多特征对,也常使用逐步积分的直接法;当结构的阻尼矩阵关于主振型没有正交性(即所谓非比例阻尼);或者在对结构物进行弹塑性反应分析时,因为刚度矩阵随着时间而变化,振型频率也随时间而变化,从而振型分解法就不便于用了,就只能应用逐步积分的直接法。当然这里谈的都是指离散化的多自由度动力方程的求解方法,而不是指连续体的动力方程的解析解法。

求解动力方程的逐步积分方法有很多种，将在本章第四节详述。

要想得到结构动力反应分析的正确结果，首先必须对结构的力学模型进行正确的抽象，即所谓的模型化。至今有以下几种模型：剪切型，即把一个结构物化成具有有限个离散集中质量的弹塑性剪切杆；相邻层间剪、弯型，即把结构物化成具有有限个集中质量，在相邻三个集中质量之间考虑弯曲效应的弹塑性剪、弯杆；剪、弯型，即把结构物化成具有有限个集中质量，同时考虑剪切和弯曲效应的弹塑性杆；考虑基础与上部结构联合作用时，将基础化为旋转和平移弹簧的剪切型、剪弯型等；杆系型，即把结构物化成附在节点上的有限个集中质量，以具有弯曲刚度或同时考虑剪切和弯曲刚度的弹塑性杆连接起来的铰接、刚接或混合连接的形式；考虑基础与上部结构联合作用，基础为桩基时，将桩化成剪、弯型的弹塑性杆，连接上、下部结构的基础块化成具有集中质量和转动惯量刚性体，上部结构化成上述各种模型，即剪弯-刚体-剪或弯剪型弹塑性杆；空间剪扭模型，即把空间结构化成有限个质量的弹塑性剪扭杆。关于各种结构力学模型的弹塑性特性及具体处理方法将在第一节中详述。

对一个构件或一个结构进行弹塑性动力反应分析时，必须弄清其力学模型在反复荷载作用下的恢复力特性，即所谓滞回曲线的类型，通常是通过实验或计算来确定的。构件的滞回曲线主要是依靠实验，再经过数学模型的简化来确定的；而结构的滞回曲线虽然也是借助一些实验结果来检验和证实，但大多要由单个构件的滞回曲线通过计算求得，然后再通过数学模型的简化来确定。滞回曲线确定得正确与否，直接影响反应结果的计算是否正确，所以除了结构的力学模型之外，滞回曲线的确定，在结构弹塑性动力反应分析中是很重要的。不过滞回曲线的类型是很多的，在第二节中将选几种主要的加以介绍。

上面所谈的滞回曲线的类型是指结构物在某一方向动力作用

下代表该结构物在该方向上某一种恢复力的特性的。显然一个结构物常受到两个或三个方向的动力作用，例如地震力对结构物的作用就有两个水平方向和一个垂直方向同时发生，通常只是为了分析的简化，才只考虑其中一个主要的水平方向的作用而已。如果考虑两个以上方向同时作用时，其恢复力特性就不应是滞回曲线，而是一个滞回曲面了。这一研究工作在国际上也是刚刚开始，是一个尚待开发的领域。目前尚采用单一曲线规律，就是认为各种内力（包括各方向的各种内力）都遵循各自单独的恢复特性——单一的滞回曲线，彼此没有相互影响，严格说来这是不正确的。不过用此法分析的结果，如果表明结构物是不安全的，那么肯定是正确的；如果表明结构物是安全（单向强度）的，就不一定是完全正确的，因为两个方向的相互影响总是具有加剧结构破坏的趋势，不过可由反应结果进行再分析和判断（例如变形不超过规定，复合强度足够，就是安全的）。

当结构物的力学模型和恢复力特性——滞回曲线的数学模型已知之后，就要求出结构各构件和结构的刚度矩阵——单元刚度阵和总刚度阵。在第三节我们将叙述各种弹塑性杆的力学模型（包括其滞回曲线）所构成的刚度阵的计算方法。

在第五节中叙述几个多自由度体系弹塑性地震反应的算例，并进行一些分析和讨论。

第一节 建筑结构的力学模型

对任何结构物不论是进行静力还是动力的分析，首先必须对其进行力学抽象，对影响结构反应（如位移，内力，速度，加速度等）的主要因素绝不能忽视，而对次要因素却可以在不同程度上加以忽略，将一受力的结构体系化成具有某种抗力性能（如抗弯剪、扭、拉压等），某种质量、转动惯量的分布形式和某种单元连接形式、边界约束单元组合体系，这就是所谓的力学模型。

在一般的工业民用建筑中,由于考虑了地震力的作用,而且有巨大破坏性的强烈地震不常发生,所以在结构的抗震设计中允许“裂而不倒”。这就要求进行弹塑性分析。至今在小变形的前提下对建筑结构进行弹塑性分析的力学模型有下述几种:

1. 剪切模型^[7,11]

对于纯框架结构较早建立的力学模型,就是把整个结构抽象为底部固定的悬臂式剪切变形的杆,各层间剪切刚度可以不同,这就是所谓的剪切模型。在进行动力分析时,通常把各层间的结构质量各半集中到上下层的楼板上,对应每一集中质量取为一个自由度。这是最简单的一种模型,不仅模型简单,分析方法也很简单。但是应该指出,这种模型由于忽略了弯曲效应,所以只对“高宽比”较小(例如小于3:1)的框架才比较适当,反之随着“高宽比”的增大,误差就会增大。另外这种模型对弱柱强梁型框架较为适宜,而对强柱弱梁型框架误差较大。

对这种模型进行分析时,首先遇到的问题就是如何计算层间刚度。在弹性分析时,可按武藤清的 D 值法^[63]计算,具有足够的精度;可是在弹塑性分析时,超过弹性阶段以后的层间刚度的计算却是一个尚未妥善解决的问题。梅村魁在〔9〕中曾提出过一种计算方法,按照各层各柱端皆出现塑性铰后的弯矩,计算各层的剪力,以导出层间刚度。这是不太妥当的,因为当各层的部分梁端、部分柱端出现塑性铰时,该层就会开始屈服,尤其像钢筋混凝土结构,在梁、柱端发生开裂之后,层间刚度就发生了变化。菅野曾提出了框架的弹塑性分析方法,这种分析方法是建立在梁、柱等各构件的弹塑性变形性能的试验基础之上的。这篇文章至今未看到原文。文献〔7〕提出根据我国学者们对钢筋混凝土梁、柱构件的试验资料分析钢筋混凝土框架的弹塑性变形过程,从中求出该类结构的弹塑性性能的所谓开裂点(实质是第一次刚度变化点)和屈服点(实质是第二次刚度变化点)的层间位移值和层间剪力值,再由此求得层间剪切刚度。

这种模型的总刚度阵是对称三对角线形式的。

2. 相邻二层间剪弯模型^[19]

这种模型考虑了框架结构的“高宽比”稍大和强柱弱梁时的相邻层间的弯曲效应，故有人称之为层间剪弯模型。这是青山博之在文献〔19〕中提出的。在这种模型中除了剪切模型中所必需的基本参数，例如层间剪切刚度以及刚度变化点所对应的层间位移或层间剪力值以外，因在每个楼板层处增加一个反映弯曲效应的弹簧，故尚需加一个弹簧刚度系数。至于弯曲弹簧的刚度系数的确定可参考〔19〕。如果弯曲弹簧刚度系数为无限大时，则退化为剪切模型。在进行动力分析时也是在每一楼层处有一集中质量，一个自由度（代表水平位移）。这种模型的总刚度阵是对称的五对角线形式。

3. 弯剪模型^[7,13,26,61]

当框架结构的“高宽比”很大（例如5以上）时，弯曲效应超过层间范围，可能占据主导地位，如烟囱之类的高耸建筑物尤为明显。这时必须按照弯剪模型进行分析才比较合理。这种模型把结构化成具有固定端的悬臂弯曲剪切变形杆。在进行动力分析时，象剪切模型一样在每一楼板层处有一集中质量，由于考虑弯曲影响，就必须考虑每层楼板处的弯曲转角，但是可利用层间和质点的平衡方程消去这些转角，所以仍然保留在每一楼层处一个水平位移的自由度。

至于这种模型的弯曲、剪切弹塑性刚度同样可由框架的弹塑性过程分析^[12]求得，通常弯曲变形呈弹性的，因为框架的弯曲刚度主要是由柱子的抗拉、压刚度构成。这种模型的总刚度阵是对称的满阵形式。当剪切刚度很大（例如为弯曲刚度的 10^5 倍以上）时，这种模型退化为纯弯模型，当弯曲刚度很大时（例如为剪切刚度的 10^5 倍以上），则退化为剪切模型。

对于可化成串联多自由度模型的框架结构，随着高宽比和梁、柱刚度比的变化，可能有更多种模型，如三层间、四层间、…弯、

剪模型，其刚度阵分别为对称七对角、九对角…形式。这是一个待开发的领域，可望用参数识别的反演方法，通过对框架结构的精确分析，得到其相应的刚度系数，然后化成串联多自由度模型进行动力反应分析。

上述这些模型中动力方程的质量阵皆为对角阵。

4. 空间剪扭模型^[15,16]

对于“高宽比”较小的框架结构，如果其平面布置的几何形状不对称，或者由于楼层上的质量不均匀，以致刚度中心与质量中心不重合时，就会产生扭转效应，而且这种效应是不可忽视的。为此提出了空间剪扭模型，它假定：(1) 楼板具有刚性周边（平面内无变形，垂直楼板面有变形）；(2) 不考虑柱子的轴向变形的影响；(3) 不计柱子的扭转刚度；(4) 柱子双向变形对其抵抗变形性能无相互影响；(5) 各柱列只具有柱列平面内的剪切刚度；(6) 与地基联接的柱脚为固定的；(7) 层间质量集中到相邻两楼板上。

根据上述假定，提出下述的空间剪扭模型，即将层间的纵向往柱列化为具有平面内剪切刚度的弹簧和并联的阻尼器。和剪切模型的情形不同，把层间质量化成楼板处的集中质量，且在每个楼层上具有三个自由度，即两个水平位移，一个转角，各柱底部为固定的。这种模型刚度阵的特点是，除去首尾各三行为 3×6 对角矩阵块以外，其余皆为 3×9 对角矩阵块。这种模型的质量阵为 3×3 的对角块阵。

5. 杆系模型^[20~24]

为了避免剪切模型、相邻二层间剪弯模型、弯剪模型等由于刚度计算所产生的误差，或剪力墙-框架结构简化成某种模型的不恰当性，致使结构分析不够准确，而提出杆系模型。以平面问题为例，这里又分三种情形：(1) 对纯框架结构（梁端无腋部，柱上无牛腿），将结构化成以各构件截面几何中心线连成的具有弯曲、剪切刚度、拉压刚度的杆，将节点间的质量各半集中到两端

节点上,一般说来,每个节点上有三个自由度(二个位移,一个转角),可是在做动力分析时,常可忽略转动惯量的影响,故在每一节点上可只考虑两个水平方向的自由度;(2)梁端有腋部或/和柱顶有牛腿或/和有剪力墙的框架结构,此时化成附有刚域杆系模型,即将梁柱化成在梁端或/和柱端附有刚域的杆,而剪力墙化成两端附有刚臂的杆,其各自的各种刚度仍按其原始截面计算,至于集中质量和自由度数仍和(1)的情形一样;(3)考虑节点区域有剪切变形的框架或剪力墙框架结构,这是武藤清在分析钢框架结构时,发现钢柱、钢梁节点处由于纯剪切变形的影响不可忽视,于是提出在(1)或(2)的基础上再考虑节点区域纯剪切角变形影响的模型。这样在建立总刚度阵时,每一节点上就有了四个静力的自由度;但在动力分析中仍然略去对应于弯曲转角和剪切转角的转动惯量,因而仍然只有两个动力自由度。上述三种杆系模型的刚度阵可按静力直接刚度法建立,质量阵都是对角阵。

6. 考虑基础与上部结构相互作用时的基础模型^[49~60,62,64]

模型1~5都是把结构的基础看作是完全固定不动的,这样就不存在上部结构对基础、地基的反馈作用了。但是结构物的实际基础,一般都会发生一定的变形,建立在软基上的筏式基础尤其如此。当基础在上部结构作用下,对地基发生相对运动时,反馈作用是不容忽视的。上部结构、基础地基的相互作用模型有:(1)旋转平移弹簧模型,就是把基础化成具有一个集中质量和一个集中转动惯量的质点,而把地基对基础的作用化为具有恢复力矩的旋转弹簧和与之并联的旋转力矩阻尼器以及具有水平恢复力的水平弹簧和与之并联的水平力阻尼器的组合;(2)半无限体模型,将地基当作半无限体通过基础与上部结构连成一体。截取足够大的地基,按有限元法将地基与基础分成有限个单元和上部结构离散化以后的单元一起形成总刚度阵和质量阵、阻尼阵进行动力分析,这是相当准确的,但耗费机时太多;(3)桩基础的弯剪转动模型,把桩基(单桩或多桩)化成弯剪模型。对连接桩与上

部结构的基础块,考虑质量(有时还需考虑转动惯量)的影响。基础附近的土壤则化成剪切模型,与桩基础共同抵抗地震力(表现在桩基础与土形成的动力方程的刚度阵中),另外在桩基础的集中质量上附加一部分土的质量(即所谓的附加质量,表现在桩基础与土形成的动力方程的质量阵中)。至于桩基础与近处土的相对运动的作用或基础周围较远处的土对基础相对运动的作用,则可化成对基础集中质量作用的平移弹簧和阻尼器,其模型如图 1.1 所示。应用此模型的关键在于计算土的附加质量、刚度系数以及远处土的平移弹簧的刚度系数。

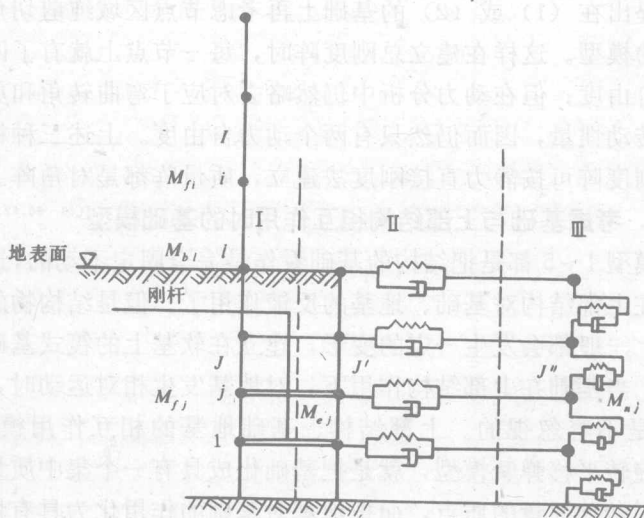


图 1.1

I—结构桩体系；II—等价土体系；III—自然土体系

图中 I——代表上部结构第 i 层间的弯曲或/和剪切弹簧及相应的阻尼器；

J ——代表桩基础第 j 层间的弯曲或/和剪切弹簧及相应的阻尼器；

J' ——代表第 j 层桩基础近处土的剪切弹簧和阻尼器；

J'' ——代表第 j 层桩基础远处土的剪切弹簧及阻尼器；

M_{ej} ——第 j 层桩基础近处土的附加质量；

M_{fi} , M_{fj} ——分别表示上部结构第 i 层和下部结构第 j 层的集中质量；

M_{nj} ——第 j 层桩基础远处土的集中质量，通常以具有单位面积及相邻两层高之半高的土桩质量来计算的；

M_{bl} ——基础质量，如果具有大的地下室，则除此集中质量之外，尚应加一集中转动惯量 I_b 。这时必须在此处增加一个转角位移的自由度。

第二节 构件及结构的恢复力特性曲线 -滞回曲线

1. 试验图形 [24, 25, 27~30, 32~36]

一个构件或一个结构物在外力作用下，随着外力的增大，其各部分的变形将会增长。开始时，抵抗变形的内力（恢复力）也会等比例地增长。随着外力的加大，内力随变形增长的比例将会减小，甚至会大大减小以至减少为零。当外力逐渐减小时，变形将会减少。当外力改变了符号，向负方向增加时，如果正向外力曾超过屈服点，则原来的正向变形就会随负向外力的增大而逐渐减少至零，然后负向变形逐渐增加。如果再逐渐卸去负向荷载，然后又正向加载则呈现与前相似的规律。如此多次循环，其变位和荷载（实际上是内力）的关系曲线就是所谓的滞回曲线。图 1.2 所示一柱子在顶端受一水平荷载作用时的滞回曲线的试验图形。

2. 数学模型 [25, 28, 29, 32~38]

滞回曲线的实验图形随着组成构件的材料、轴向力的大小、端部固定情况而变化。可谓千姿百态，研究者们从中抽象出来的数学模型不下 20 种，大致可分为两大类，一类是曲线型，其中最早

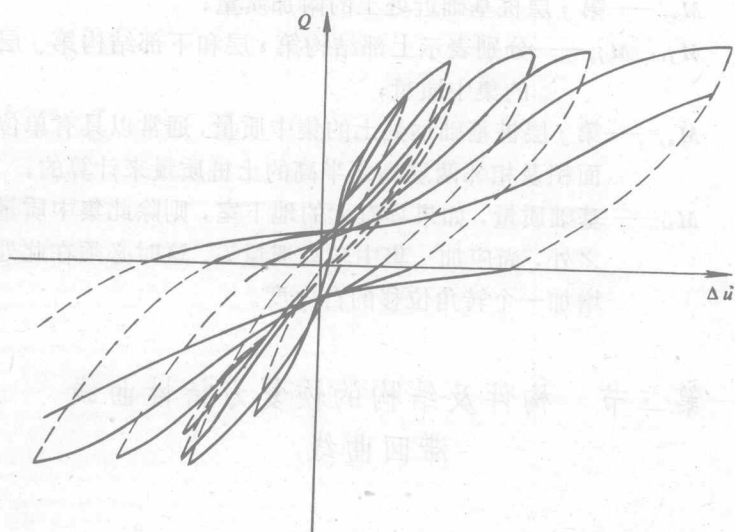


图 1.2

提出的是适用于钢材的 Ramberg-Osgood 型^[38]和后来由谷资信^[35,36]提出的适用于钢筋混凝土材料的另一种曲线型。由于曲线型公式复杂,应用不便,所以就不详细介绍了。另一类是分段直线型的,其中有:

(1) Neilsen 的退化双线型,如图 1.3 所示。其中卸载回线的斜率 (K_y) 表达式为

$$K_y = K \left(\frac{x_y}{x_{\max}} \right)^a \quad (1.2.1)$$

式中 x_y ——正、负加载的屈服变形的绝对值;

K ——在变形 $|x| < x_y$ 时,正、负向加载或卸载的直线的斜率;

$x_{\max}$ ——当 $|x| > x_y$ 时曾经达到的变形绝对值的最大值;

a ——刚度退化指数,当 $a=0$ 时,Neilsen 模型就变成较早提的非退化的双线型模型。

Neilsen 模型对钢材是适宜的。

将 $(x_{\max})_1$ 、 $-(x_{\max})_2$ 代入 (1.2.1) 中可分别求出 K_{y1} 、 K_{y2} ，且 $K_{y2} < K_{y1}$ (图 1.3)。

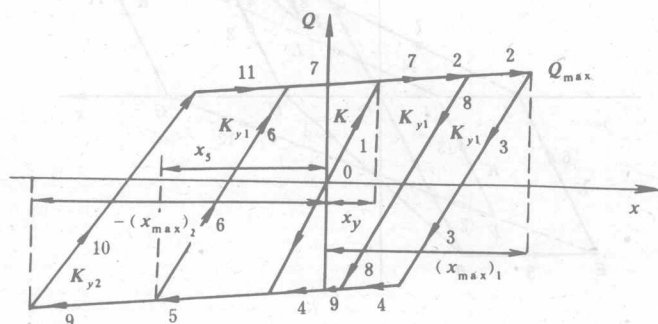


图 1.3

图 1.3 中的数字表示随着力的变化，变形变化路线的序号，由图中可见路线序号为 3、6、8 的回线的斜率皆等于 K_{y1} ($|x_5| < (x_{\max})_1$)，因为路线序号为 3、6、8 的回线对应于 $x_{\max} = (x_{\max})_1$ 的情况。一旦力 $|Q|$ 增加大于图 1.3 中的 $Q_{\max}$ 时，显然 $x_{\max}$ 就大于图 1.3 中的相应值，例如路线序号 10 对应的 $x_{\max} = -(x_{\max})_2$ ， $Q_{\max} = |Q|_{\max}$ ，从此以后的各回线的斜率就皆决定于新的 $x_{\max}$ 为 K_{y2} 。

(2) Clough 的退化双线型，如图 1.4 所示。这是对钢筋混凝土构件首先提出的滞回曲线模型。图中数字意义与图 1.3 相同，关于退化刚度的计算方法，按最近一次反向变形的最远点来计算，例如第 6 条线的 J 点以后线路 7 的斜率（刚度）则由 J、C 两点坐标计算如下：

$$K_7 = \frac{Q_C - Q_J}{x_C - x_J}$$

同理，第 9 条线路的 K_9 由 L、C 两点坐标计算，第 12 条线路的 K_{12} 由 G、E 两点的坐标计算（最远点指向）等等。

(3) 退化的三线型，如图 1.5 所示。这是武藤清对图 1.4 的模