

钢结构稳定设计

钟善桐 编著

中国建筑工业出版社

钢结构稳定设计

钟善桐 编著

中国建筑工业出版社

(京)新登字035号

本书主要叙述钢结构各种基本构件临界力的确定,及其在实际设计中的稳定计算方法。叙述中在介绍稳定理论的同时密切地与钢结构设计新规范GBJ17—88相联系。书中内容包括有:实腹式轴心受压构件、格构式轴心受压构件、变截面轴心受压柱、受弯构件、组合构件中的薄板、压弯构件、框架柱等的稳定计算问题。

本书可作为工业与民用建筑钢结构研究生及本科生的教材,并供从事钢结构教学科研的教师和设计人员参考。

责任编辑 黎 钟
技术设计 郭耀秀
责任校对 廖晓明

钢 结 构 稳 定 设 计

钟善桐 编著

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 11¹/₈ 字数: 297 千字

1991年11月第一版 1991年11月第一次印刷

印数: 1—4,720 册 定价: 9.05 元

ISBN7—112—01354—2/TU·990

(6396)

前 言

稳定问题是钢结构的突出问题，因为钢材具有轻质高强的特点，截面比较开展而纤细。

众所周知，防止构件或结构的稳定破坏并非使它们的实际应力低于某规定值，而是要防止一种特殊的不稳定平衡状态的发生。这种状态的特征是：当荷载仅有微量增加时，应力应变不按比例发展，而应变显著增长，且增长量无法确定。可以认为：构件或结构的失稳破坏是它们内部抗力的突然崩溃。这就是钢结构屈曲现象的特征，不论发生破坏时构件的工作属于弹塑性或弹性工作阶段，破坏特征完全相同。

由于结构或构件的失稳破坏比较突然，屈曲一旦发生，结构随即崩溃，因而远比强度破坏危险。这从很多实际工程事故实例中可以得到证实。因而从事钢结构设计的工作人员，对钢结构的稳定问题应予以特别的重视，要掌握稳定问题的本质和规律以及正确的计算方法，从而避免工程中的失稳破坏。

近百多年以来，很多突出的科学工作者对钢结构的稳定问题进行了很多研究，取得了很大成就，做出了卓越的贡献。不过，由于稳定问题的复杂性，尤其是考虑到构件存在缺陷和残余应力的影响，再加上钢材进入弹塑性工作阶段的应力应变非线性性质，就更增加了解决各类稳定问题的困难。因此，在钢结构稳定问题的研究领域，还存在着不少问题尚未很好解决，等待着从事钢结构研究工作的同志们去研究和充实。

为了帮助钢结构研究生掌握这方面的基本知识，了解研究现状及发展趋势，作者于1982年开始编写本书，并在教学中多次使用，取得了预期的效果。1988年又结合钢结构设计新规范 GBJ

17—88，进行了一次全面的修改和补充。

本书的特点是：在介绍稳定理论和临界力确定方法的基础上，紧密地结合钢结构设计新规范GBJ 17—88，使学习者重视实际，做到理论与实际相结合。

本书可作为钢结构研究生的教材，也可供工业与民用建筑专业本科生，以及从事钢结构教学科研的教师和广大的科技工作者参考。

由于个人水平所限，可能存在错误，不当之处，谨请读者批评指正！

钟善桐

于哈尔滨建筑工程学院

基本符号

内、外力

N —轴心压力；
 N_K —临界力；
 N_E —欧拉临界力；
 N_t —切线模量理论临界力；
 N_r —双模量理论临界力；
 N_ω —扭转临界力；
 N_0 —弯扭临界力；
 V —剪力；
 M —弯矩；
 M_y —纤维屈服弯矩；
 M_P —部分截面发展塑性时钢梁的极限弯矩；
 M_u —钢梁塑性铰极限弯矩；
 M_E —欧拉临界弯矩；
 M_K —临界弯矩或纯扭抵抗力矩；
 M_x —扭矩；
 M_ω —约束扭转抵抗力矩；
 B —双力矩；
 F —集中荷载；

q —均布荷载。

f_P —钢材比例极限；
 f_u —钢材抗拉强度；
 f_y —钢材屈服点；
 f —钢材强度计算值；
 σ —正应力；
 τ —剪应力；
 σ_c —局部压应力；
 σ_r —残余应力；
 σ_K —临界应力；
 σ_ω —约束扭转正应力；
 σ_0 —腹板弯曲临界应力（考虑翼缘板嵌固作用）；
 σ_{c0} —腹板局部挤压临界应力（同上）；
 τ_0 —腹板临界剪应力（同上）；
 ε —应变；
 δV —应变能增量；
 δU —荷载势能增量。

几何特性

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 引言	1
第二节 稳定问题分类	5
第三节 稳定的基本概念及临界力的解法	8
第二章 实腹式轴心受压构件的稳定计算	15
第一节 两端铰接杆的弯曲屈曲	15
第二节 边界条件对弯曲屈曲的影响	19
第三节 非弹性屈曲的临界力	23
第四节 采用大挠度理论确定临界力	27
第五节 轴心受压构件的扭转屈曲	35
第六节 轴心受压构件的弯扭屈曲	42
第七节 缺陷和残余应力对临界力的影响	48
第八节 弹性支座轴心受压杆的临界力	54
第九节 钢结构设计规范对轴心受压构件稳定计算的规定	61
第十节 薄壁型钢结构技术规范对轴心受压构件稳定计算 的规定	70
第三章 桁架中轴心受压杆件的计算	79
第一节 桁架受压弦杆的临界力	79
第二节 桁架中腹杆的临界力	85
第三节 腹杆斜向屈曲时的临界力	91
第四章 格构式轴心受压构件的稳定计算	97
第一节 格构式缀条柱的临界力	97
第二节 格构式缀板柱的临界力	108
第三节 分肢格构柱的临界力	112
第四节 轴心受压柱横向剪力的确定	114

第五章	变截面轴心受压柱的临界力	119
第一节	分段变截面柱	119
第二节	弦杆直线变化柱	124
第三节	定截面和变截面混合柱	126
第六章	受弯构件的横向(弯扭)屈曲	129
第一节	受弯构件横向屈曲的基本概念	129
第二节	简支梁横向屈曲的临界荷载	132
第三节	悬臂梁横向屈曲的临界荷载	140
第四节	设计规范对梁整体稳定计算的简化	141
第七章	组合构件中薄板的稳定	160
第一节	薄板稳定的基本概念	160
第二节	薄板在纵向应力作用下的临界力	166
第三节	薄板在剪应力作用下的临界力	174
第四节	薄板在挤压应力作用下的临界力	179
第五节	梁腹板在几种应力共同作用下的屈曲	181
第六节	设计规范对梁腹板局部稳定计算的简化	200
第七节	实腹梁腹板的屈曲后强度	207
第八章	压弯构件的稳定	227
第一节	压弯构件稳定的基本概念	227
第二节	按弹性稳定理论确定压弯构件在弯矩作用 平面内的临界力	229
第三节	采用压溃理论确定压弯构件在弯矩作用 平面内的临界力	232
第四节	工字形截面压弯构件在弯矩作用平面内临界力的 近似解	238
第五节	端弯矩不等时在弯矩作用平面内的临界力	243
第六节	压弯构件在弯矩作用平面外的临界力	246
第七节	设计规范GBJ17—88对压弯构件稳定计算的规定	248
第八节	格构式压弯构件的临界力	255
第九章	框架柱稳定	261
第一节	框架柱稳定的基本概念	261
第二节	单层框架等截面柱的计算长度	263

第三节	多层框架等截面柱的计算长度	279
第四节	框架柱轴心压力不相等时的计算长度	287
第五节	单层框架变截面柱的计算长度	295
附录一	钢材的强度设计值	302
附录二	工字形截面简支梁的系数 β_b	303
附录三	整体稳定系数 φ_b	304
附录四	轴心受压构件的稳定系数	305
附录五	柱的计算长度系数	308
附录六	型钢规格及截面特性	316
附录七	各种截面回转半径的近似值	344

第一章

概 述

第一节 引 言

钢材属于轻质高强材料，因而钢结构构件截面都比较纤细。这样的构件在承受压、弯或压弯时，如果刚度不足，常发生屈曲破坏。因此，稳定问题是钢结构设计中的突出问题。

虽然在过去近百年中，对稳定问题已经进行了很多研究，取得了很大成就；但到现在为止，这方面的研究仍未能结束，还有不少问题未获得满意的解决。这是由于问题本身的复杂性，同时牵涉到材料的基本性能以及结构的型式和构造等问题。

在确定构件的屈曲强度时，并不是使结构或构件的应力低于某一规定的应力，例如强度设计中采用的钢材屈服点，而是要防止一种特殊的不稳定平衡状态的发生。这种状态的特征是，当荷载有微小增加时，应力与应变不成比例，且应变显著地增长，同时增长量无法确定。这种内部抗力的突然崩溃就是屈曲现象的特征，不管在破坏瞬间截面应力是否已超过弹性极限。

由于结构或构件的屈曲破坏比较突然，屈曲一旦发生，结构随即崩溃（实腹式构件中腹板的屈曲例外），因此，远比强度破坏危险得多。国内外钢结构由于压杆屈曲而导致结构倒塌的事故不乏其例。为此，设计中对于结构或构件稳定性的保证必须认真对待。

人类显然早已观察到受压构件稳定破坏的现象，但第一个研究柱稳定问题的欧拉（L. Euler, 1744年），他提出了计算二端铰接理想直杆临界力的著名公式：

$$N_E = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2} \quad (1-1)$$

式中 E ——材料的弹性模量；
 I ——柱毛截面的惯性矩；
 l_0 ——柱的计算长度。

由于当时采用的建筑材料强度较低，柱截面都比较粗大，因而屈曲问题并未被人们重视。当出现了用金属材料做的柱后，欧拉公式又不能成功地运用于短柱和中等长度的柱中，因而欧拉的出色贡献差不多被埋没了一百年之久。

直到1889年，法国的康息德尔（Consideré）和德国的恩格塞尔（Engesser）分别获得结论，认为以广义形式来表示的欧拉公式在任何情况下都是有效的。

$$N_t = \frac{\pi^2 E_t I}{l_0^2} \quad (1-2)$$

$$N_K = \frac{\pi^2 \bar{E} I}{l_0^2} \quad (1-3)$$

式（1-2）是恩格塞尔（Engesser）提出的切线模量（ E_t ）理论公式；式（1-3）是康息德尔（Consideré）提出的广义欧拉公式，式中 \bar{E} 是变化的模量，介于弹性模量和切线模量之间。

切线模量理论认为，直杆当轴心压力达临界力时，由直杆平衡状态转变为无限接近的弯曲平衡（微微弯曲）状态，应该以这时截面应力对应的切线模量来计算临界力（图1-1）。从而获得公式（1-2）。上述概念明显地存在着矛盾：既然认为杆件出现平衡分枝时轴心压力不变，则杆件发生弯曲时截面上必定发生部分纤维的压应变增加，和部分纤维的压应变减少；压应变减少的部分是卸载，这部分材料恢复弹性工作；那么，为什么只根据轴心压力取相应的切线模量来计算呢？为了弥补上述矛盾，1895年恩格塞尔又发表了双模量理论。即认为杆件出现平衡分枝时，部分截面取切线模量，部分截面取弹性模量，由此来确定杆件的临界力为

$$N_c = \frac{\pi^2 \bar{E} I}{l^2} \quad (1-4)$$

式中 \bar{E} 称为折算模量, $\bar{E} = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{I}$; I_1 和 I_2 分别是截面的弹性部分和弹塑性部分的惯性矩, I 是整个截面的惯性矩。

从此, 双模量理论被认为是非弹性范围内确定柱临界力的正确理论。但是, 在随后的很长时间里, 对于双模量概念是否正确又引起了一些疑问。因为很多试验结果表明, 轴心受压杆的屈曲荷载处于根据切线模量理论求得的临界力和按双模量理论求得的临界力之间, 而通常却更接近于切线模量理论计算值。

表面上似乎很精确的双模量理论所求得的屈曲荷载, 在很多情况下比精确试验得到的值为大。这一令人迷惑不解的现象直到 1947 年向磊 (Shanley) 发表论文后才得到解释。

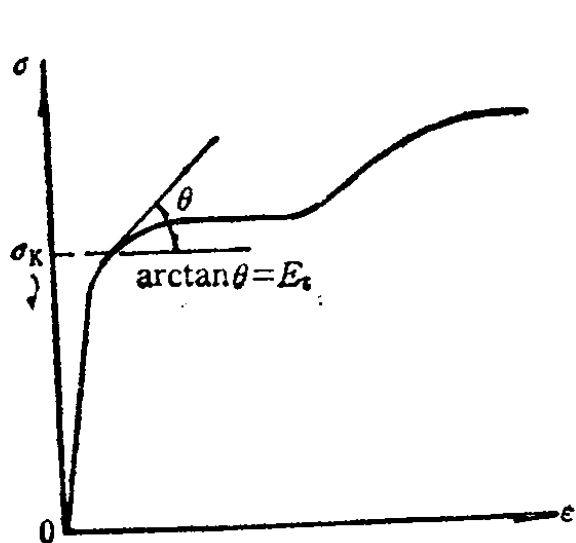


图 1-1 钢材的切线模量

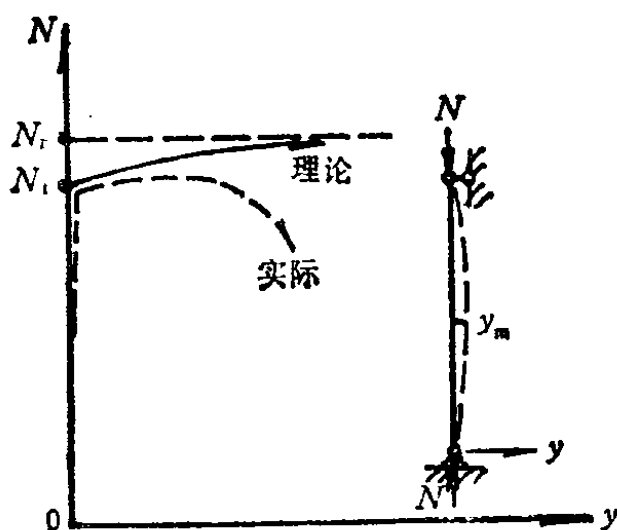


图 1-2 弹塑性阶段轴心受压杆屈曲与挠度的关系

向磊通过试验并用分析方法阐述了柱在非弹性范围内的工作性质。他指出双模量理论存在两个问题: 第一, 在弹塑性阶段工作的柱达到双模量临界力 N_c 前仍保持直线的假定并不正确, 因为实际上在达到切线模量临界力 N_k 时就开始弯曲; 第二, 作用于杆件的压力 N 在 N_k 和 N_t 之间变化时, 在增加弯曲的同时, 也增加轴心压力, 只在出现一定的挠度时, 才形成卸载部分。因

此，当 N 由 N_1 增加到 N_2 时，挠度值由零增到无穷大，如图1-2中实线所示。

切线模量荷载虽然并未准确地给出压杆的实际屈曲荷载（即在不大的挠曲下柱子能承受的荷载），但它可作为屈曲荷载的下限，而双模量荷载 N_2 是事实上达不到的上限。

对于工程结构中采用的大多数钢柱，切线模量荷载只比实际临界荷载稍微低一些。

压弯构件是既受压又受弯曲的构件，包括偏心受压构件。这类构件在弯矩作用平面内的稳定问题非常复杂，尤其进入弹塑性工作阶段。它的承载力不但和弯矩 M 、轴心压力 N 大小有关，而且还和荷载作用过程有关；即 M 和 N 按一定比例同时加载，或者 M 和 N 分先后次序加载时，构件的稳定承载力是不同的。同时不但截面上存在塑性区，而且沿杆长也存在塑性区，因而，给计算带来很多困难。关于偏心受压构件在弯矩作用平面内稳定的计算，最早的理论认为使柱边缘纤维应力到达屈服点时的荷载是临界荷载。这一概念混淆了强度与稳定的区别。只对长细比较大或偏心较大的长柱，计算结果才比较符合试验值，因为这时构件属于弹性阶段工作。

卡门（Karman, 1910年）第一个把偏心受压柱的屈曲荷载作为稳定问题来考虑，用数值分析法对矩形截面偏心受压构件的极限承载力作了详细的研究，给出了较为完整的又较精确的分析结果；同时注意到短柱和中等长度柱对荷载偏心很敏感，荷载偏心大大降低了这些柱的承载力。

此后，赫瓦拉（Chwalla.E, 1928~1937）进一步发展了卡门的方法，用来分析不同荷载和其它截面的情况，取得了很大的成就。但是，这种比较精确的分析方法对于实际构件的稳定计算非常繁复，只有在六十年代后，随着电子计算机的广泛使用，才得到重视，并逐渐地得到应用。

为了简化偏心受压构件临界荷载的求解，除上述数值分析法外，出现了一些近似计算方法，其中以耶硕克（Jezek, K.1934）

提出的近似方法较为简便，精确度也高。

对于偏心受压构件的稳定问题，除上述在弯矩作用平面内的稳定问题外，如果截面在垂直于偏心所在平面方向（出平面）的刚度较小，且又无支撑时，构件将产生该方向的屈曲破坏，这种现象称为弯矩作用平面外的稳定问题。失稳的形式常为弯曲伴随扭转，或称为弯扭屈曲，问题则更为复杂。除理论计算方法外，也发展了一些近似计算方法。

以上是压杆的稳定问题。除此以外，钢结构中还有受弯构件的稳定、薄板的稳定和框架的稳定等。这些都比压杆稳定问题复杂，但都已得到了一定的研究和解决，都有可供设计应用的计算方法。

第二节 稳定问题分类

上节介绍的轴心受压理想直杆在到达临界荷载之前一直保持直杆平衡，在到达临界荷载时发生微小的偏离直线位置的弯曲，但仍处于平衡状态；当荷载超过临界荷载一微量时，杆件就失去平衡，不断挠曲而至破坏。这说明，杆件具有两种稳定平衡状态，即达临界状态时，由直线平衡状态转变到曲线平衡状态，这

称为平衡的分枝。如图1-2所示。

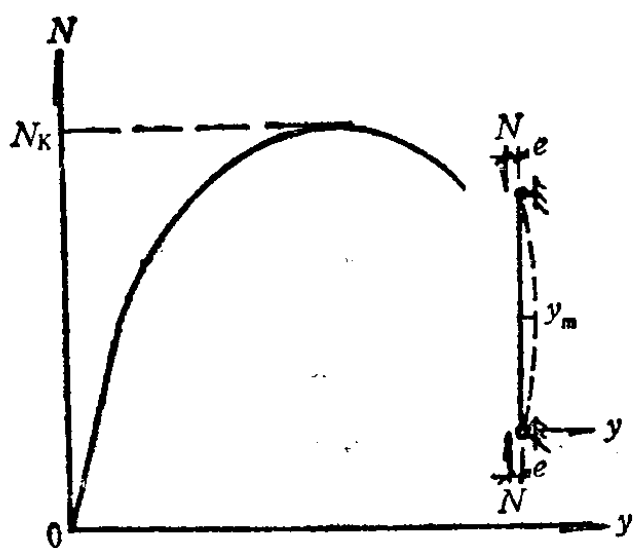


图 1-3 偏心受压杆的 $N-y$ 关系

对于偏心受压杆，情况就不同。荷载开始作用时，杆件就发生弯曲。在荷载低于临界荷载之前，杆件随时都处于弯曲的平衡状态；而在到达临界荷载后，平衡状态被破坏了，杆件随即崩溃，如图1-3所示，也即只存在着一种

稳定平衡状态。

显然，这两种杆件的工作性能不一样，破坏过程和破坏时的危险程度也不同，求临界荷载的方法也各异。因此，稳定问题可分两类：第一类稳定是具有平衡分枝的稳定；第二类稳定只具有弯曲的平衡状态。

但是，第一类稳定问题只是一种理想情况，对于实际结构或构件并不存在。例如，轴心受压的理想直杆，总存在一些初始缺陷，如杆轴线的弯曲、荷载作用的偶然偏心以及截面上的残余应力等；即使在实验室的条件下，也不可能完全消除这些初始缺陷。因而，第一类稳定并不存在。尽管如此，由于解决具有平衡分枝的第一类稳定问题比较方便，理论也较成熟，因而很多问题目前仍按照第一类稳定求解临界力，而采用安全系数的方法来考虑初始缺陷的影响。例如：轴心受压杆（柱）的稳定、梁的整体稳定、薄板的稳定以及框架的稳定等。不过轴心受压杆的稳定问题，近年来已开始按照具有初始偏心的第二类稳定问题来确定它的临界力。图1-4a和c表示轴心受压柱和梁的荷载变形关系，实线为理论曲线，虚线为实验曲线。理论曲线与实验曲线有一定差别；但当变形较大时，临界荷载的差别并不大。

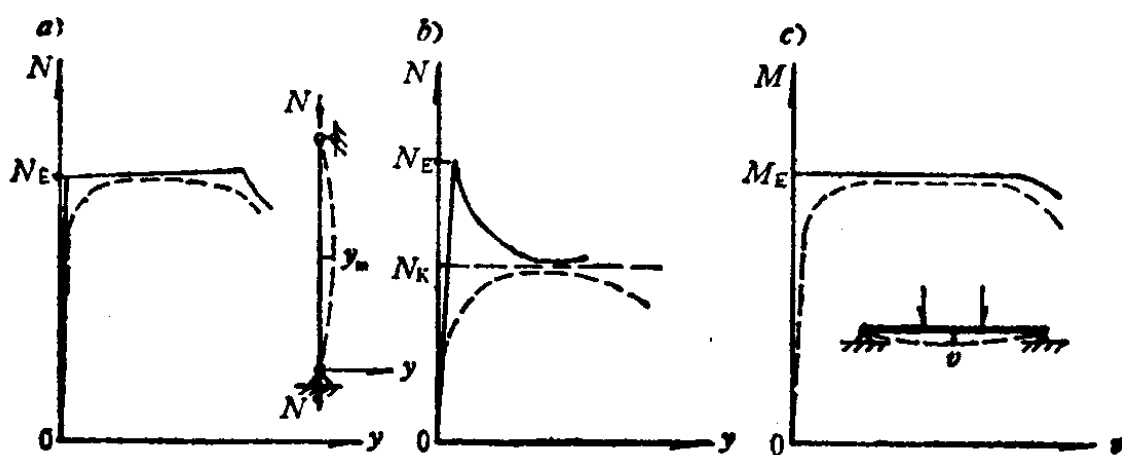


图 1-4 柱和梁的临界荷载与变形的关系

a) 普通轴压杆；b) 轴压薄壁圆管；c) 梁

图1-4b表示薄壁圆管的轴心受压杆，这类杆件的稳定问题受杆件缺陷的影响很大；因而实际临界力 N_K 要比理想欧拉力 N_E 低

很多。理论计算表明：当圆筒壁具有局部凹陷(对称缺陷)时，临界力将迅速下降，如图1-5所示。当 δ/t 为0.5时，临界力下降到理论值的0.35，此处 t 是壁厚， δ 是凹口深度。因为圆管的局部凹陷处产生横向压力，促进了杆件的整体失稳。这类轴心受压杆件对缺陷非常敏感，设计和制造时应特别注意。

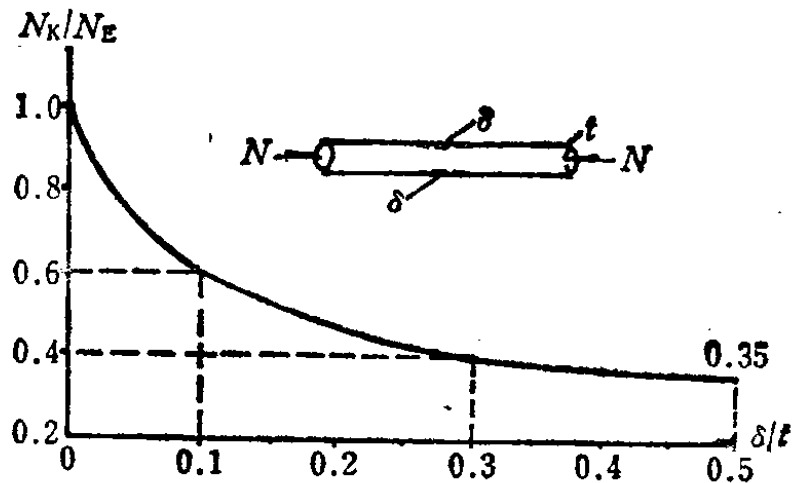


图 1-5 薄壁圆筒轴压时临界力和局部缺陷的关系

稳定问题不但和杆件初始缺陷有关，而且也和构件的边界条件有关。

图1-6示四边简支的薄板，二对边承受着均布压力。设板为理想平板，无局部缺陷，荷载作用于板的中面。当荷载达临界荷载 N_E 时，薄板屈曲，形成鼓曲，如图1-6a所示。由于中部鼓凸，二侧边必将弯曲、靠近，这时的临界荷载为理想平板的欧拉力。但是，如果侧边支座具有一定的刚度，当薄板鼓凸时保持直线，则当荷载达 N_E 且薄板产生屈曲现象的同时，二侧边对薄板中面立即产生横向张力 T ，阻止板的屈曲；使薄板能继续承受荷载，直至薄板边缘屈服为止。这就提高了薄板的稳定承载力 N_K ，如图中b、d所示。支座边对板的横向张力 T 称为薄膜张力，薄板稳定承载力的提高称为屈曲后的强度。

图1-7示坦拱受横向荷载的作用。当拱内力达临界力时，发生屈曲；如果支座允许产生位移，拱即屈曲破坏。如果支座保持不动，拱屈曲后产生支座张力，承载力又能继续上升。

其他如轴心受压杆件,若二端为铰接,通常在屈曲时二端支座即发生位移,因而属于第一类稳定问题,可由此确定理论临界力。但如果两端支座限制杆端相向位移时,也将使临界力提高。又如理想直梁的侧向屈曲,如受压翼缘在支座上能保持不动,不能产生相向位移时,也会提高梁的稳定性。综上所述可知,构件的

支座条件对稳定有很大影响。这里是指支座的线位移,不包括支座的转角;后者属于弹性支座,在设计中一般都应加以考虑。

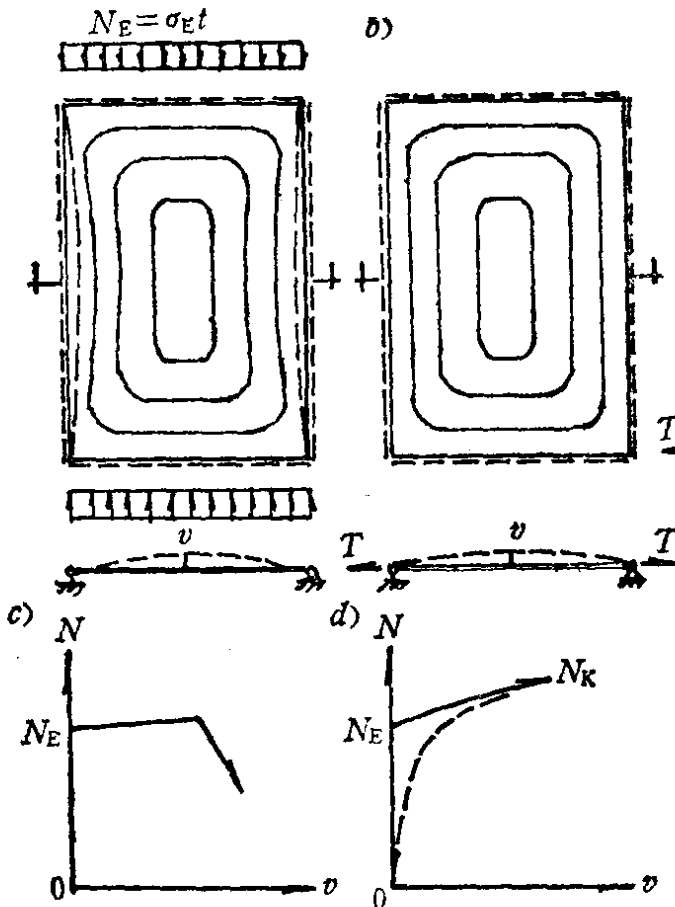


图 1-6 薄板受均布压力作用时的稳定

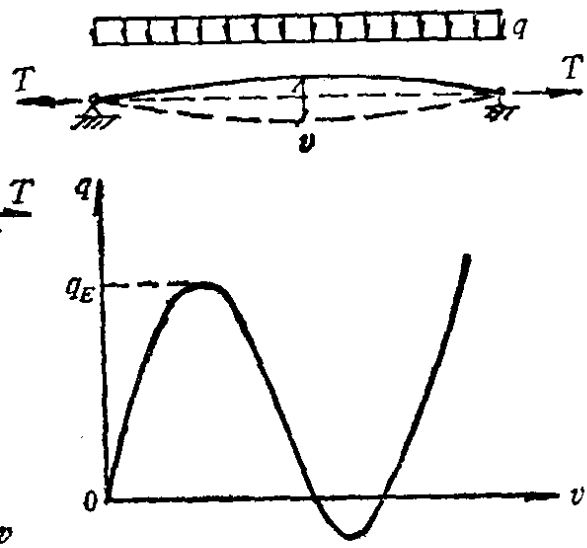


图 1-7 坦拱的屈曲

第三节 稳定的基本概念及临界力的解法

求解结构和构件的稳定承载力时(临界力),首先要判定它的状况是稳定的或不稳定的。通常都用小球的位置来作比拟,如图1-8所示。

当小球置于碗口向上的碗中(图1-8a),从任意方向对小球加一干扰力,使小球离开原来位置,但当干扰力撤去后,小球立即回到原来位置。这种位置的小球的平衡是稳定的。如把小球置