

钢筋混凝土抗震结构的延性及延性设计

内蒙古人民出版社

钢筋混凝土抗震结构的延性及延性设计

孙克俭 著

内蒙古人民出版社

1991·呼和浩特

(内蒙)新登字 1 号

钢筋混凝土抗震结构的延性及延性设计

孙克俭 著

*

内蒙古人民出版社出版发行

(呼和浩特市新城西街 82 号)

内蒙古新华书店经销 内蒙古新华印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张 9.5 字数:200 千

1995 年 6 月第 2 版 1995 年 6 月第 2 次印刷

印数:1-2,000 册

ISBN7-204-01466-9/TU·1 每册:4.30 元

内 容 提 要

本书系统论述了钢筋混凝土结构的延性，给出了计算截面的延性、构件的延性和结构的延性的方法；给出了钢筋混凝土结构的延性设计方法，包括延性验算和延性构造措施；分析了影响钢筋混凝土结构延性的因素。

本书可供土木工程技术人员、研究人员及高等院校师生参考。

前 言

我国是一个多地震国家，近些年来多次发生强烈地震，给人民生命和财产造成巨大损失。因此，加强对建筑抗震能力的研究，以减少或避免地震造成的灾害，是建筑领域的一个十分重要的课题。

结构的延性是结构抗震的重要课题。

抗震结构的延性与强度不但同等重要，而且更有意义，它是结构抗震能力的重要指标。一个好的抗震结构，一是要具备足够的强度和良好的延性。因此，抗震结构不但要进行强度设计，还要进行延性设计，这是目前抗震设计与一般静力设计的根本区别。

本书主要论述了现浇钢筋混凝土抗震结构的延性和延性设计。

由于作者水平有限，本书一定会有缺点或错误，敬请读者批评指正。

作 者

1990年1月1日

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 抗震结构延性设计的提出	(1)
第二节 结构延性的概念	(3)
第三节 钢筋与混凝土材料的力学性能	(12)
第二章 延性系数的计算	(23)
第一节 钢筋混凝土构件截面的延性系数	(23)
第二节 钢筋混凝土构件的延性系数	(80)
第三节 钢筋混凝土结构的延性系数	(92)
第三章 抗震结构的延性设计	(150)
第一节 概述	(150)
第二节 钢筋混凝土结构的延性分析	(155)
第三节 钢筋混凝土构件截面的延性设计	(201)
第四章 影响钢筋混凝土结构延性的因素及分析 ...	(223)
第一节 影响构件截面延性的因素及分析	(223)
第二节 影响钢筋混凝土梁延性的因素 及分析	(229)
第三节 影响钢筋混凝土柱延性的因素 及分析	(239)
第四节 影响钢筋混凝土框架节点延性的因素 及分析	(259)

第五节	影响钢筋混凝土剪力墙延性的因素 及分析	(265)
第五章	钢筋混凝土结构的延性构造措施	(272)
第一节	钢筋混凝土梁的延性构造措施	(273)
第二节	钢筋混凝土柱的延性构造措施	(275)
第三节	钢筋混凝土框架节点的延性构造 措施	(280)
第四节	钢筋混凝土剪力墙的延性构造 措施	(286)
主要参考文献		(291)

第一章 绪 论

第一节 抗震结构延性设计的提出

大量的震害实例分析表明，按传统强度概念进行抗震设计与实际震害有很大矛盾。按传统强度概念，结构的强度越高越好，而且刚度随之增加。但实际震害往往是刚度很大的结构遭破坏，而刚度相对较差的结构没有破坏。这是因为构件的刚度越大吸引地震力越大，其塑性变形能力一般较小，因而耗能能力差。如果没有其他途径耗散所吸收的地震能量，则只有通过破坏的途径来释放。一般刚度相对较差的结构由于有较大的变形，主要是塑性变形，来耗散所吸收的地震能量，因此，适当细柔而塑性变形能力较大的结构反而比刚强的结构更耐震。刚度过大，不但无益反而有害。

另外，地震及其运动带有很大的不确定性，因而对建筑结构的作用也是不确定的。地震区的结构在使用期间内可能遭遇到预期的一般强度的地震，也可能遭遇到非常强烈的罕遇大震。如果按罕遇大震来进行弹性设计，结构的断面会异常大，高层建筑尤其如此。这显然是极不经济的。

抗震设计不能依据传统的强度概念进行弹性设计，必须考虑结构和构件的塑性变形能力，在设防烈度下允许结构出现可修复的损坏。当超过设防烈度时，利用结构的塑性变形吸收和消耗巨大的地震能量，保证结构裂而不倒。

结构或构件的塑性变形能力是结构或构件的延性性质的表现。如果一个结构延性好，则它有较强的塑性变形来耗散结构在地震时所吸收的能量，使结构主体免于破坏。所以抗震结构的能力合乎逻辑的标准，是耗散地震能量的能力，而不是传统的单以强度为依据。

图 1.1 表明延性结构和脆性结构的能力，两者具有相同的屈服强度，曲线下面的面积分别代表各自的作功能力。延性结构的能力显然比非延性结构大得多。

由上所述，抗震设计必须引入一个概念——延性，并把

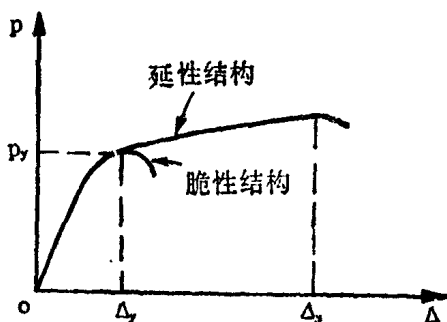


图 1.1

它加到传统的尺度——强度上去。这就是说，抗震结构不但要有适当的强度——这是普通的常识，而且还必须有良好的且足以消耗地震能量的延性——这是尚未得到普遍了解和重视的概念。

延性与强度同等重要，而且延性更有意义，它是结构抗震能力的重要指标。如果结构的设计保证了结构的延性，使结构理想地进入塑性阶段工作，那么实际发生的地震尽管可能比规范规定的地震力大好几倍，但结构会借助于延性，消

耗地震能量，把地震力压低到规范的数值。这样，就解决了地震作用的不确定性问题。同样，结构的良好延性也能减小爆炸荷载对建筑物的惯性力，使结构免遭破坏。对超静定结构，当发生不可预见的超载以及不可预见的沉降时，结构将借助于延性将这些影响重新分配到结构的其他部分。因此结构的延性能适应未预计的超载、冲击、反复荷载以及地基沉降和体积变化引起的结构运动。另外，当一个结构设计成延性时，它的破坏来得缓慢且不突然，住户将会在临近破坏之前得到预告，减少损失。

由此可见，一个好的抗震结构一定要具备足够的强度和良好的延性，这是抗震设计与一般静力设计的根本区别。因此，在对抗震结构进行强度设计的同时，还要进行延性设计，这样才能使抗震设计既符合经济原则又安全可靠。

第二节 结构延性的概念

1. 延性的定义 延性 (Ductility) 是指结构毁坏之前，在其承载能力无显著降低的条件下经受非弹性变形的能力。结构的延性也就是结构在外荷载（或基础下降）作用下，其变形超过屈服，结构进入塑性阶段后，在外荷载继续作用下，变形继续增长，而结构不致破坏的性能。延性反映了结构在地震作用下耐变形的能力和消耗地震能量的能力。所谓结构或构件的延性好，就是在外荷载作用下有较大的塑性变形能力，从而消耗更大的能量。如果结构或构件破坏的话，其破坏是有预告而非突发性的。与延性相反的概念是脆性。脆性结构没有塑性变形能力，其破坏是在结构或构件超过弹性极限后突然发生。图 1. 1 给出了延性结构与脆性结

构的力——变形关系曲线。力和变形都是广义的。力可以是应力、荷载、力矩，变形可以是应变、挠度、曲率或转角。图中 Δ_y 为屈服变形，相应于力——变形曲线转折点处的横坐标。对钢筋混凝土构件它相应于受拉钢筋应力达到屈服点时的变形。 Δ_u 为极限变形，相应于力——变形曲线上这样点的横坐标，过此点后，力——变形曲线的斜率为负值。对钢筋混凝土构件，它相应于受压区混凝土压碎时的变形。

从图 1.1 可见，当脆性材料或脆性结构达到屈服变形 Δ_y 时，就发生突然破坏，而延性材料或延性结构达到屈服变形 Δ_y 后，还要经历很长的塑性变形 $\Delta_u - \Delta_y$ 才破坏。

2. 延性的度量 从图 1.1 可以看出结构的延性，可以用总的极限变形 Δ_u 来度量，也可以用非弹性变形 $\Delta_u - \Delta_y$ 来度量，或是用力——变形曲线下的面积（变形能）来表示。但是普遍采用延性系数来度量。

所谓延性系数 μ ，是结构、构件或材料破坏前的极限变形（最大弹塑性变形） Δ_u 与屈服变形（最大弹性变形） Δ_y 之比：

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1.1)$$

上述定义中的变形 Δ 是广义的，可以是应变、挠度、曲率或转角，因具体研究对象定。

由这个延性系数的定义和，脆性材料及脆性结构或构件 $\mu = 1$ ，延性材料及延性结构或构件 $\mu > 1$ ，并且 μ 值越大，则延性越好。

对于往复加荷的结构或构件的延性，还可以用它的恢复力特性曲线来描述和评定。

恢复力特性曲线是结构在荷载作用下的力——变形函数曲线。它表明结构或构件在受扰产生变形时，企图恢复原来状态的抗力与变形大小的关系。弹性结构的恢复力特性曲线是线性的。而弹塑性钢筋混凝土结构，由于在外力作用下，随着荷载的增加，要逐渐经历混凝土开裂、钢筋屈服、混凝土酥裂直至结构崩溃、倒塌几个过程。在这不同的过程中，力与变形之间的关系是不同的，所以弹塑性钢筋混凝土结构的恢复力曲线是非线性的。

恢复力曲线一般都是由试验来确定。通过对梁、柱、剪力墙或单元结构等各类模型的试验，就可以得到相应的弯矩——转角、弯矩——曲率、荷载——位移等等关系曲线。在动力荷载作用下，钢筋混凝土构件恢复力曲线的形状大体如图 1.2 所示。这种在循环荷载作用下的恢复力特性曲线，叫

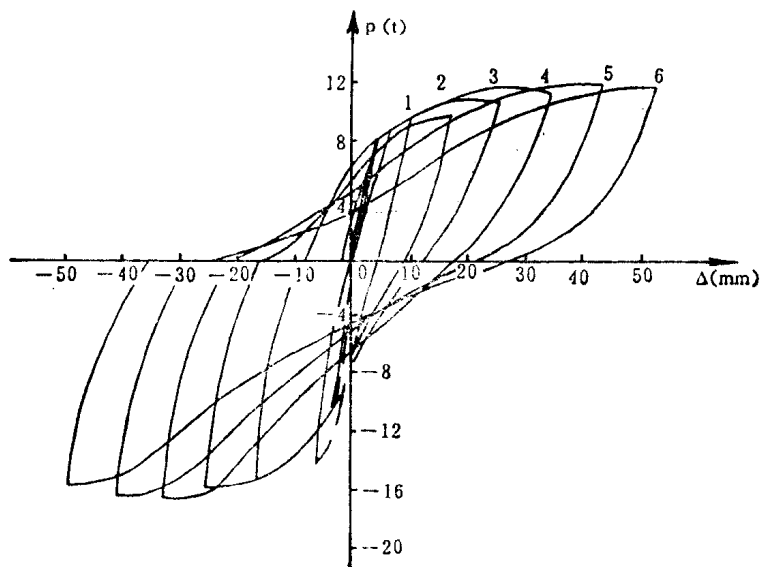


图 1.2

滞回曲线。它是由许多滞回环组成。荷载每循环一次就得到一个滞回环，它充分反映了结构的强度、刚度和能量吸收以及构件破坏等力学特性，这些特性都是分析结构地震反应的重要依据。滞回曲线下所围的面积是结构或构件吸收的能量或耗散的能量，所以滞回曲线代表了结构非弹性耗能能力，反映了结构或构件的延性性能。

滞回曲线平稳、丰满，所围的面积大，则耗能能力大，说明结构的延性好。如果第一次循环后，所围的面积越来越小，则耗能能力小，说明结构的延性差。图 1.3 是钢杆的滞回曲线，它平稳、丰满，说明钢杆延性好。图 1.4 是素混凝土的滞回曲线，显然其延性差。

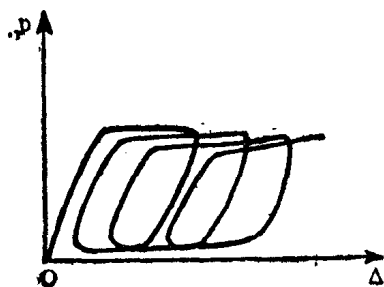


图 1.3

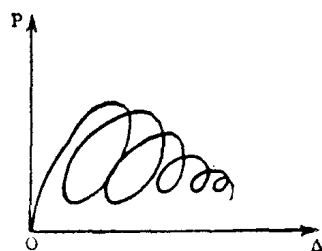


图 1.4

为了得到结构或构件的滞回曲线，试验时要有一定的加荷制度。一般是施加分级增大的多次反复的作用力，或是每加一次荷载控制一定的变形增量。

把各级循环荷载下滞回环的顶点（如图 1.2 中的 1、2、3……各点）连成曲线，叫做骨架曲线。结构设计所依据的

就是这样的骨架曲线和滞回特性。为了应用方便，通常还要把骨架曲线简化成为便于数学表达的形式。这种简化了的便于数学表达的恢复力特性骨架曲线，就是结构的恢复力模型。

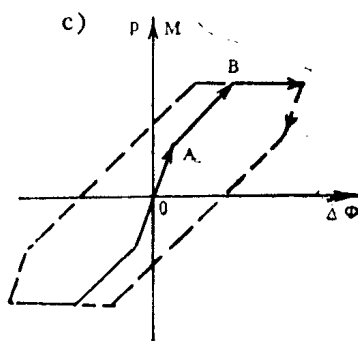
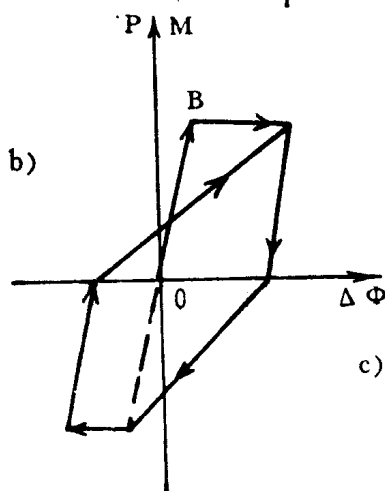
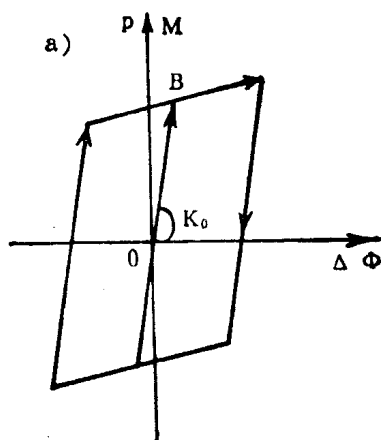
常用的恢复力模型有双线型（图1.5a），双线退化型（图1.5b），三线型（图1.5c），三线退化型（图1.5d）等等。它们的外形轮廓线是以试验结果的骨架曲线为根据。

钢筋混凝土结构一般采用三线退化型，其原因是：有出现裂缝和逐步形成塑性铰的过程，以及因为裂缝不闭合引起钢筋混凝土构件的截面削弱；钢筋的包兴格效应（Bauschinger effect）；裂缝的开展与闭合引起混凝土的破坏；在多次循环荷载作用下混凝土与钢筋之间粘着锚固的逐步破坏；在地震反复荷载作用下，存在的较大剪力将增加塑性铰区的剪切变形等原因，造成刚度降低和耗能能力损失，即所谓的退化效应。

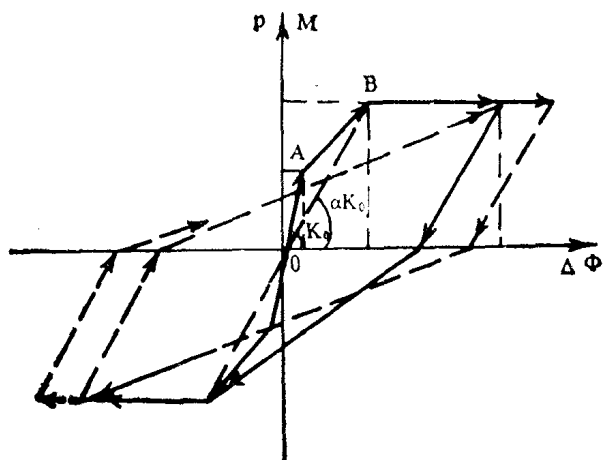
图1.5d所示三线退化型中， A 点为钢筋混凝土结构的开裂点， B 点为屈服点， K_0 为弹性刚度， αK_0 为屈服点的割线刚度， α 是割线刚度降低系数。开裂点通常由开裂荷载和弹性刚度决定，屈服点通常由屈服荷载和屈服点割线刚度决定。

当不考虑开裂点和退化效应时，就是二线型。这是一种最简单的模型。当二线型中的屈服刚度等于零时，就成了完全塑性的双线型。所谓理想弹塑性体系，其恢复力模型就是完全塑性双线型（图1.5e）

恢复力模型主要取决于开裂荷载、屈服荷载、弹性刚度和刚度降低系数。



d)



e)

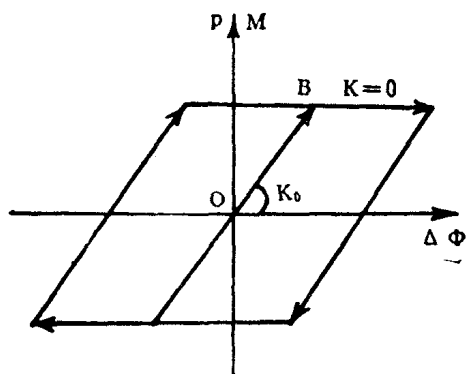


图 1.5

3. 延性的分类 前述延性系数的定义是一个广义的定义，其内容和量值应根据具体情况而定。它可以下述几方面分类。

(1) 按研究对象分类：可以分为材料的延性、构件截面的延性、构件的延性和结构的延性。研究对象不同其延性

系数的值也不同。例如素混凝土材料的延性系数仅为1~2, 延性很差。但对素混凝土配以钢筋, 则其截面的延性系数可达10~20, 可见必须区分延性是指什么对象而言。

(2) 按变形的性质分类: 由于 Δ 值取值的内容不同, 则延性分为曲率延性、转角延性、总位移延性和楼层相对位移延性。

当变形 Δ 是以曲率 φ 衡量时, 则 $\mu_\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y}$, 称为曲率延性系数。当变形 Δ 是以转角 θ 衡量时, 则 $\mu_\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$, 称为转角延性系数。当变形 Δ 是以结构总位移来衡量时, 则 $\mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$ 称为总位移延性系数。当变形 Δ 是以楼层相对位移衡量时, 则 $\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$, 称为楼层位移延性系数。

总位移延性和楼层位移延性, 这两个延性概念是描述结构系统总体状况的, 对抗震设计很重要。但是由于它们受较多因素的影响, 且带有一定的随机性, 往往难以精确计算。而转角延性和曲率延性主要反映塑性铰区的状况, 是描述个别关键部位特性的。转角延性取决于塑性铰区的长度和曲率、弯矩、剪力沿整个构件的分布, 而截面的曲率延性(即截面延性)一般只与材料和截面的特性有关, 因此通常均以曲率延性系数 μ_φ 来间接反映结构的塑性变形程度。

同一个结构的延性系数由于变形 Δ 的衡量形式不同, 所得到的 μ 值将不同。例如6层高的钢筋混凝土框架, 按整个结构定义的延性系数总是小于按楼层相对位移定义的延性系数。钢筋混凝土构件, 按位移定义的延性系数与按转角定义