

建筑结构损伤控制设计

Damage Control-Based Design of Buildings

[日] 和田 章

WADA Akira

岩田 卫

IWATA Mamoru

清水敬三

SHIMIZU Keizo

安部重孝

ABE Shigetaka

川合广树

KAWAI Hiroki

著

曲 哲

裴星洙

叶列平

译

校

中国建筑工业出版社

建筑结构损伤控制设计

[日] 和田 章
岩田 卫
清水敬三 著
安部重孝
川合广树

曲 哲 译
裴星洙
叶列平 校

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字:01-2013-8550号

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构损伤控制设计/(日)和田章等著;曲哲等译.—北京:中国建筑工业出版社,2014.7

ISBN 978-7-112-16378-6

I. ①建… II. ①和… ②曲… III. ①建筑结构—损伤(力学)—设计
IV. ①TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 022937 号

Kenchikubutsu no Sonshou Seigyo Sekkei

Copyright © 1998 Akira Wada, Keizo Shimizu, Hiroki Kawai, Mamoru Iwata,
Shigetaka Abe

Chinese translation rights in simplified characters arranged with
Maruzen Publishing Co. Ltd., through Japan UNI Agency, Inc., Tokyo.

本书由日本丸善出版株式会社授权我社翻译、出版、发行

责任编辑:王跃 刘文昕 吉万旺

责任设计:董建平

责任校对:张颖 陈晶晶

建筑结构损伤控制设计

[日] 和田章 岩田卫 清水敬三 安部重孝 川合广树 著
曲哲 裴星洙 译
叶列平 校

*

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

北京楠竹文化发展有限公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本:880×1230毫米 1/32 印张:7 $\frac{3}{8}$ 字数:263千字

2014年11月第一版 2014年11月第一次印刷

定价:29.00元

ISBN 978-7-112-16378-6

(24876)

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)



译者序

土木工程结构是地震灾害的最主要载体，通过技术创新提升工程结构的抗震性能也是“基于性能的地震工程”的最重要支承。技术创新不能只停留在理论层面，而是一个将创新性想法付诸实践，在解决实际问题的过程中不断完善并最终得以推广应用的完整过程。在过去的 20 年间，隔震技术和消能减震技术在日本的大量应用成为地震工程领域技术创新的两个成功典范。这两种损伤控制新技术在日本的发展经历非常相似，都经历了较长的探索期，并终于在 1995 年日本阪神地震后被社会广泛接受，迎来了高速发展期。截至 2010 年，日本全国已有逾 8000 栋建筑采用了隔震或消能减震技术。

二者的另一个共同特征是蕴含其中的损伤控制思想。正如和田先生在本书序言中提到的，像建筑结构的“锁骨”这样的损伤控制思想早已有之。回头看时一目了然，隔震建筑的隔震层和消能减震建筑中的阻尼器都是这样的“锁骨”，但是技术创新的真正挑战在于如何率先将思想付诸实践，如何将实践推广应用，总之，如何“让思想解决问题”。这也正是本书最可宝贵之处。它全面介绍了在建筑结构设计实现损伤控制思想的方方面面的实际问题，并将理论与实践紧密结合，给出了具体的解决方案和工程应用实例。然而，本书并不是像旁观者一样对 20 世纪 90 年代日本损伤控制设计理论的总结，实际上，本书的作者们所代表的正是这一发展历程中的开路者。

如今，损伤控制结构已被日本民众所熟知，损伤控制思想也已被世界地震工程界广泛接受为一种实现高性能抗震结构的有效途径。但近年来几次严重的地震灾害表明，“让思想解决问题”依然任重道远。不妨简单回顾一下。1994 年 6.7 级美国北岭地震和 1995 年 7.3 级日本神户地震造成的直接经济损失分别是 418 亿美元和 1025 亿美元，后者占当时日本 GDP 的 2.5%。时隔十几年后，2010~2011 年新西兰坎特伯雷

地震造成近 300 亿美元的直接经济损失，约占新西兰 GDP 的 20%。2008 年汶川地震造成的直接经济损失更是高达 8451 亿元人民币，近 7 万同胞在地震中丧生！以减轻地震损失为己任的损伤控制思想不但没有过时，反而正当其时。

往往有一种误解，认为损伤控制之类的东西只适用于发达国家，对于我国西部欠发达地区或者像海地那样贫穷的国家，是一种不切实际的奢望。诚然，损伤控制结构最早是在日本这样的发达国家发展起来并得到广泛应用的。其发展必然以日本发达的经济和技术水平为基础。但如果因此便想当然地将损伤控制结构与高昂的造价捆绑起来，则已偏离了损伤控制的初衷。日本传统的五重塔中贯穿全塔的芯柱便是日本人在与地震灾害的长期斗争中总结出的经济而有效的损伤控制方法。最近，它为当今世界第一高塔——2012 年建成的高 634m 的东京天空树——的结构设计提供了灵感。以更低的价格和更优的性能提供更好的服务是商业竞争的不二法门。同样，以更经济的方式提供更高的抗震性能，正是损伤控制设计的根本出发点。希望读者在阅读本书的过程中不满足于“损伤控制等于加阻尼器”这样表面化的观点，而能够细心体会作者真正想要传达的思想。僵化且大包大揽的设计规范体系使人们不再关注建筑结构的实际性能。不但买冰箱的人不再关心冰箱的性能，连设计和生产冰箱的人也变得麻木，这实在难以想象。而类似的事情正发生在建筑结构领域。经济发展水平固然是建筑抗震性能的基础，但对风险的麻木和漠视才是真正可怕的。损伤控制设计号召人们以经济性为目标灵活地应对风险。看到风险便迈出了减小损失的第一步。本书作者结合日本国情给出了损伤控制设计的一个答案。希望本书有助于启发我国的工程师们结合国情给出自己的答案。

本书没有过于艰深的理论，而是更加注重对建筑结构基本概念的理解与把握。这与本书作者们的背景不无关系。和田先生早年长于计算分析，理论基础深厚，曾帮助日本著名建筑设计公司——日建设计——奠定了自主进行建筑结构非线性动力反应分析的基础，同时自己也积累了丰富的工程经验。在东京工业大学任教之后，和田先生仍保持与工业界的紧密合作，基于损伤控制思想与新日本制铁等公司共同研发出世界上最早的防屈曲支撑。书中介绍的基于损伤控制的抗震设计实例也是世界上最早采用防屈曲支撑的超高层结构。本书其他四位作者分别长期工作于新日本制铁、大林组、竹中工务店和日建设计。这些重量级的设计、承包单位的积极参与是损伤控制思想得以实现技术创新所必不可少的。

本书很多内容涉及日本建筑结构设计的基本概念和方法。为便于国内读者理解，译者根据需以注释的形式补充了相关的背景内容。希望读者在阅读本书的同时也能够对日本的建筑结构设计，特别是抗震设计有初步的了解。

本书的翻译得到了和田先生的大力支持。在和田先生的鼓励与帮助下，译者纠正了原书中的一些纰漏之处，同时删略了一些内容，也有少量的增补。可以说是同时进行了再版修订与翻译的双重工作，谨希望能够尽量准确地传达原书作者的想法。由于译者能力有限，书中不免存在疏漏甚至谬误之处，敬请专家同行指正。

曲哲 裴星洙

2013年1月13日

于日本东京

序 言

1989年美国 Loma Prieta 地震的震害使人们开始意识到,罕遇地震下保证生命安全固然重要,但对于像大城市那样人口密集、经济活跃的地区,还应关注地震造成的直接经济损失和正常经济活动中断带来的间接经济损失,并应在建筑抗震设计中考虑建筑功能在震后的快速恢复。1994年美国北岭(Northridge)地震和翌年的日本阪神·淡路大地震(以下简称“阪神地震”)后,这一观点在美国和日本受到越来越多的重视。

地震作用下建筑结构的损伤程度按从轻到重可分为“可忽略不计的损伤”、“轻微损伤”、“中度损伤”、“严重损伤”和“完全破坏”等几个等级。对于建筑功能而言,中间三个损伤程度通常分别对应于“维持使用功能”、“保护财产安全”和“保障生命安全”等抗震性能目标。日本浓尾地震^①已过去一百多年,20世纪初的美国旧金山地震^②至今也已逾百年。在此期间,美国和日本在建筑抗震设计方面开展了大量的研究,并逐步形成了使建筑主体结构进入塑性并耗散地震能量以抵御地震作用的抗震设计思想。这一思想以避免建筑物完全破坏为目标,在抗震设计中通过主体结构的损伤来换取生命安全。虽然这一点是值得肯定的。但它并未考虑财产安全和建筑功能的可持续性。

毫无疑问,一个国家的建筑物总体抗震性能取决于其经济实力和技

译注:

① 1891年10月28日当地时间6时38分在日本浓尾平原(今岐阜县)发生8.0级地震。极震区地裂严重,喷砂、涌水,山崩、滑坡计1000余处,最大水平位移达8m,最大垂直位移达5.4m,铁道、公路破坏严重,94%的房屋破坏,死亡7200余人,伤17000余人,房屋坍塌142177间,是日本明治时期造成破坏最严重的地震。

② 1906年4月18日当地时间5时12分美国旧金山市发生7.9级地震,震后发生大火,全市5.3万座房屋中的2.8万座被毁,近40万居民中的22.5万人失去家园。

术水平。离开这两点,必要的抗震性能无从谈起。日本建筑基准法规定了一个最低标准,但仅有最低标准是不够的,如果从整个城市的抗震性能以及经济活动可持续性的角度出发,还应考虑大地震后建筑的可修复性,并建立相应的抗震设计方法。对于天崩地裂的特大地震,可沿用现行的以保障生命安全为目标的抗震策略,但对于现行抗震规范中的罕遇地震,完全可以采取更加有效的抗震设计思路,比如使柱、梁等主体结构构件保持弹性,而通过与主体结构并联设置的滞回型阻尼器集中耗散地震输入能量以减轻结构损伤。

从1992年春开始,本书的五位作者对于上述抗震设计思想达成共识,并以大型工程设计项目为依托开展了大量技术研发和科学研究工作。这些都是1994年和1995年两次大地震之前的事。美国北岭地震之后,专门用于消能减震的阻尼器开始大量应用于美国的建筑结构。日本也是如此,阪神地震后出现了在建筑结构中设置阻尼器的热潮。当时笔者就有编写本书的计划。1997年夏天某期《工程新闻记录》(ENR, Engineering News Records)在封面刊登了减震结构的概念图和简要的说明,其中使用了Sacrifice(牺牲)一词,即高层建筑结构中的减震支撑通过自身的轴向塑性变形耗散地震能量,以自我牺牲的方式帮助主体结构抵御大地震的袭击。日本现行抗震设计方法是从1981年6月开始颁布实施的。其中规定的建筑结构抗侧承载力需求取决于一个结构特性系数 D_s 。结构中的抗震墙或者斜撑越多,其结构特性系数 D_s 就越大,结构的抗侧承载力需求也就越大^①。这使得结构工程师倾向于采用 D_s 较小的纯框架结构,无形中形成了对纯框架结构的一种“优待”。以钢框架结构为例,大地震中预期“牺牲”的部位通常靠近梁端翼缘的焊接部。然而美国北岭地震和日本阪神地震的震害均表明,对梁端的塑性变形和耗能能力不能有过高的预期。框架结构依靠梁端塑性变形耗散地震能量的抗震设计方法相当于将结构体系中的弹性部分与弹塑性耗能构件串联起来,耗能构件一旦进入塑性,整体结构将随之发生过大的变形。这样的建筑结构体系并不合理。

译注:

① 该方法要求结构的抗侧承载力 Q_u 应不小于其抗侧承载力需求 Q_{un} ,其中 $Q_{un} = Q_{ud}F_{cs}$, D_s , Q_{ud} 为地震作用引起的层剪力; F_{cs} 为体系系数; D_s 为考虑结构延性与阻尼特性的结构特性系数。对于纯框架结构, D_s 通常为0.25~0.3;对于剪力墙结构或支撑框架结构, D_s 则为0.4~0.5。

随着北岭地震震害调查的深入开展,到1998年夏天为止,美国洛杉矶的工程师们已发现在北岭地震中有超过200栋建筑在梁端出了问题。为避免类似震害重演,研究人员开展了大量实验研究,但仍有许多问题有待解决。日本阪神地震后也发现有约40栋建筑在梁端发生了断裂。但由于种种原因,并未针对这一问题开展全面而彻底的调查。不论是美国还是日本,这类问题主要发生在没有设置任何斜撑的纯框架结构中。而在钢筋混凝土结构中,抗震墙往往能发挥很好的抗震作用。尽管尚难以准确界定斜撑和抗震墙在建筑结构抗震中的作用,但总的来说,它们在抗震设计中可视为一种“牺牲”(Sacrifice)构件。

斜撑失稳后承载力会急剧降低,抗震墙也容易发生剪切破坏。或许是对此怀有成见,1970年代的国际地震工程界主要以纯框架结构为研究对象,这也促成了在抗震设计中对纯框架结构的优待的形成。另一方面,斜撑和抗震墙虽然能够有效保证建筑结构在地震作用下的安全,但是斜撑失稳与抗震墙剪切破坏均不利于震后建筑的修复与再利用。与之相比,本书将要介绍的在建筑结构适当部位设置专门的消能减震装置以耗散地震能量的抗震策略,即所谓的“损伤控制结构”,或可成为今后抗震设计的发展方向。

1933年,寺田寅彦^①在《藏前新闻》发表了名为《锁骨》的随笔。文章以“小孩从楼梯上掉下来摔伤”为引子,介绍了人体的骨骼结构。文章写道:“锁骨似乎就是为了在这样的情况下发生骨折而存在的。它像保险丝一样心甘情愿地通过骨折来保护肋骨和身体中其他更重要的部分”。他接着写道:“作为一个外行,我总在想能不能在某些部位设置‘房屋的锁骨’,当发生大地震时确保那里首先‘骨折’,从而保护建筑中其他更重要的部分。这种想法很早以前就有了。有时也向搞建筑的学者介绍我的想法,但是没人能听进去。”其实这正是损伤控制结构。

在日本关东大地震十周年,即1933年之际,田边平学^②出版了《抗震建筑问答》一书。该书虽因其提出的将地基适当放松以形成隔震结构的思想而著名,但也提到了斜撑的抗震作用。书中写道:“如果采用芯

译注:

① 寺田寅彦(1878~1935),日本物理学家、散文家、诗人。

② 田边平学(1889~1954),日本结构工程学者,建筑师。

墙^①，柱子便会暴露在外，斜撑也会暴露在外，无论从结构体系上还是建筑外观上，都不像西方建筑那么自由。……但是像在日本这样地震多发的国家，利用比较粗壮的斜撑将墙面划分成三角形似乎更加合理，以往那种仅仅由柱子和梁组成的四边形体系反而让人觉得有些奇怪。”

目前已开发出多种专门的消能减震装置，有的利用钢材的塑性变形耗散能量，有的利用黏性或黏弹性材料来耗散能量。这些装置均可设置在建筑结构中以抵抗结构的层间变形。

以在框架结构中设置 45° 斜撑为例，斜撑的伸缩量是框架结构层间位移的 $1/\sqrt{2}$ 倍，斜撑的长度为梁长的 $\sqrt{2}$ 倍，所以斜撑的轴向应变是框架结构层间位移角的 $1/2$ 。假设斜撑与框架结构之间的连接部位的刚度和承载力都很大，不会发生塑性变形，且考虑钢材的屈服应变通常略大于 0.1% ，则斜撑屈服时所对应的层间位移角非常小，仅约为 $1/500$ 。

对于使用钢板抗震墙的情况，因为钢材的剪切屈服强度为轴向屈服强度的 $1/\sqrt{3}$ ，剪变模量约为弹性模量的 $1/2.6$ 倍，所以剪切屈服应变约为轴向屈服应变的 1.5 倍左右 ($= 2.6/\sqrt{3}$)。因此与斜撑一样，钢板抗震墙屈服时所对应的层间位移角也非常小，仅为 $1/750$ 左右。

如果斜撑和钢板抗震墙均采用低屈服点钢材，或者使塑性变形集中在某一局部内，则可进一步减小这些构件屈服时对应的结构层间位移角。

下面来看看由柱和梁通过刚性节点组成的钢框架结构的屈服层间位移角。对于钢框架结构，由梁的弯曲变形引起的结构变形占整个结构变形的近一半，以下主要讨论梁端的转动变形。假设梁受反对称弯矩作用，梁的跨度为 L ，截面高度为 D 。梁端翼缘应力达到屈服应力 σ_y 时，梁的变形角可写为 $(\sigma_y/3E) \cdot (L/D)$ 。一般情况下，梁的跨度 L 是给定的，钢材的弹性模量 E 也是一个定值。采用屈服强度 σ_y 较高的钢材或减小梁截面的高度 D ，均可在一定范围内相对自由地提高钢框架结构的屈服层间位移角。

译注：

① 芯墙（真壁）是夹在柱子之间的木隔墙，其特点是柱子露出于墙体表面，是日本传统木结构住宅的典型建造样式之一。与之相对的是大壁，木墙板钉在柱子外侧，故在外观上看不见柱子。

综上所述,通过选择合适的材料和调整截面尺寸,可以比较自由地调整纯框架结构的屈服变形。与之相比,斜撑和抗震墙等消能减震构件的屈服变形则主要取决于结构布置和材料的选择,板厚等局部形状的调整则对其屈服变形影响不大。

若不能很好解决斜撑失稳和抗震墙剪切破坏的问题,当斜撑或抗震墙与纯框架结构共同工作时,斜撑或抗震墙达到极限承载力时的变形远远小于纯框架部分,若进一步加载,它们的承载力会显著退化,这样一来整体结构的承载力将不是斜撑或抗震墙的承载力与框架部分的承载力之和。

对于斜撑,已经开发出防屈曲支撑;对于钢板抗震墙,则可通过设置加劲肋防止局部屈曲,这样就大幅提高了这些先于主体结构屈服的消能减震构件的变形能力。这使得弹性主体结构与减震子结构并联的双重结构体系成为可能。以斜撑或抗震墙的形式抵抗单位水平力所需的用钢量远远小于纯框架,因此损伤控制结构在经济性方面也有很大的优势。

出于对环境问题的考虑,人们越来越关注建筑结构的寿命。目前的设计往往只考虑建筑竣工时的质量,即保证竣工时建筑处于最佳状态。如果从建筑需要在数十年甚至数百年间长期使用的角度来看,竣工时的最优则未必是全生命周期内的最优。人们早已意识到内部装修和空调等设备的寿命不尽相同,在设计时需要考虑到局部翻新或更换设备的可能性,因此在设计中将主体结构 with 设备管线分离,使设备与结构分别占据不同的空间。抗震设计也有必要采用类似的方法。以往的结构设计是让承受竖向荷载的柱和梁同时也承受地震作用,还要将塑性变形能力也叠加上去。在美国北岭地震和日本阪神地震中纯框架钢结构的震害充分暴露了这种抗震理念的不足。理想的减震结构是让承受竖向荷载的主体结构在地震作用下始终保持弹性,而通过消能减震构件耗散地震能量。其特点是在结构体系中将承受竖向荷载的与耗散地震能量的两个具有不同功能与特性的部分明确区分开来。

建筑的建造总要接受行政部门的审查,不仅在日本,在其他国家也是一样。虽然上述减震结构不仅具有优越的抗震性能,而且从结构造价上来讲也比传统抗震结构更加合理,但遗憾的是,仅仅因为现行法规中没有关于这类结构形式的相关规定便不得不按特殊结构进行专门的审查^①。

译注

① 类似于我国的超限审查。日本建筑基准法规定高度超过 60 米的建筑结构设计必须通过超限审查,此外,隔震结构、消能减震结构等特殊结构体系也需要进行超限审查。

隔震结构也面临同样的问题。在减震结构中耗能减震构件往往会使用特种钢材或黏弹性材料。但在日本建筑基准法规定的第1阶段设计中,钢结构必须采用容许应力设计法^①。问题在于,减震结构中的耗能减震构件在第1水准地震作用下即应屈服。

因此,希望能够对建筑基准法作必要的修改,使设计具有更大的自由度,为普及推广减震结构和隔震结构创造良好的环境。这样做对审查部门的技术水平可能会提出更高的要求。也希望能够将审查资格向社会开放。

在将减震结构应用于实际工程中时,减震构件难免会像墙体一样占据或阻隔建筑空间。建筑不应仅由楼板、柱子和门窗构成,建筑需要墙体,这一点希望建筑师们能够理解。

和田 章

1998年7月

译注:

① 日本建筑基准法规定的第1水准地震作用在设计反应谱方面大致相当于我国的8度小震。建筑基准法要求第1水准地震作用下按容许应力法进行结构验算。详见第一章译注。

《建筑结构损伤控制设计》编委会

和田章 (Akira Wada) [第 1、2 章]

1946 年 出生于日本东京

1968 年 毕业于东京工业大学工学部建筑系

1970 年 于东京工业大学研究生院理工学部获硕士学位

1970 年 就职于日建设计股份有限公司 (至 1981 年)

1981 年 于东京工业大学获工学博士学位

1982 年 东京工业大学工学部建筑系 助理教授

1989 年 东京工业大学工业材料研究所 教授

1997 年 东京工业大学建筑物理研究中心 主任

2005 年 日本学术会议 准会员

2011 年 东京工业大学 名誉教授

2011 年 日本学术会议 会员

获奖 1995 年日本建筑学会奖 (论文)

2003 年日本建筑学会奖 (技术)

2011 年 Fazlur R. Khan 终身成就奖章 (CTBUH)

著作 「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」(《建筑抗震设计中的承载力与变形能力》, 合著), 日本建筑学会

「免震構造設計指針」(《隔震建筑设计指南》, 合著), 日本建筑学会

「官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説」(《政府设施的整体抗震规划标准及条文说明》, 合著), 建设大臣官房厅营缮部

岩田卫 (Mamoru Iwata) [第 3、4 章]

1947 年 生于日本静冈县

1970 年 毕业于东京工业大学工学部建筑系

1975 年 于东京工业大学研究生院理工学部获工学博士学位

曾任新日本制铁股份有限公司建筑事业部部长 (钢结构技术)、名古屋工业大学客座教授

现为神奈川大学教授

获奖 1998 年日本建筑学会奖 (论文)

著作 「はじめてのシステムトラス」(《网壳结构入门》,合著),建筑技术
「鋼構造座屈設計指針」(《钢结构稳定性设计指南》,合著),日本建筑
学会

清水敬三 (Keizo Shimizu) [第 5 章]

1940 年 生于日本东京

1963 年 毕业于早稻田大学理工学部建筑系

1966 年 于早稻田大学研究生院理工学部获工学硕士学位

1973 年 于英国南安普顿大学获博士学位

1992 年 于早稻田大学研究生院理工学研究所任兼职讲师 (至 1998 年)

现任 大林组股份有限公司理事兼东京总部设计总部部长,日本建筑学会评
议员

著作 「構造の動的解析」(《结构的动力分析》,合著),技报堂出版社

「板構造の解析」(《板式结构的分析》,合著),技报堂出版社

安部重孝 (Shigetaka Abe) [第 5 章]

1936 年 生于日本福岡县

1960 年 毕业于九州大学工学部建筑系

现任 就职于竹中工务店股份有限公司东京总部设计部。

川合广树 (Hiroki Kawai) [第 6 章]

1938 年 生于日本东京

1963 年 毕业于早稻田大学第一理工学部建筑系

1965 年 于早稻田大学研究生院理工学部获硕士学位

1965 年 就职于日建设计股份有限公司 (至 1997 年)

1997 年 于东京大学获工学博士学位

现为 EQE 国际常务董事

目 录

第 1 章 绪论

1.1 损伤控制设计	4
1.1.1 抗震设计发展简史	4
1.1.2 超高层建筑的抗震设计	9
1.1.3 损伤控制设计方法	10
1.2 外部作用与结构损伤	11
1.2.1 性能目标的设定	12
1.2.2 损伤控制设计	14
1.2.3 可靠度工程与损伤控制	15
1.3 新材料与新技术	16
1.4 可持续性建筑结构	17
参考文献	18

第 2 章 结构动力学基础

2.1 什么是振动	19
2.2 单自由度体系无阻尼自由振动	20
2.2.1 单自由度体系的运动方程	20
2.2.2 振动体系的能量平衡方程	22
2.2.3 框架结构简化为单自由度体系	24
2.2.4 由多个弹簧组成的振动体系	25
2.3 有阻尼单自由度体系的自由振动	26
2.3.1 什么是阻尼	26
2.3.2 黏性阻尼体系自由振动的运动方程	27

2.3.3 确定阻尼比的近似方法	28
2.3.4 以能量形式表达的运动方程	29
2.4 黏性阻尼单自由度体系的强迫振动	31
2.4.1 简谐荷载作用下的强迫振动	31
2.4.2 阶跃荷载作用下的强迫振动	38
2.4.3 矩形脉冲荷载作用下的强迫振动	39
参考文献	40

第3章 损伤控制结构的基本原理

3.1 什么是损伤控制设计	41
3.1.1 损伤控制设计与风险应对	41
3.1.2 损伤状态与损失	43
3.1.3 建筑物使用寿命内的总地震损失	47
3.2 什么是损伤控制结构	56
3.2.1 损伤控制结构的形式	56
3.2.2 主体结构特性	59
3.2.3 减震装置的特性	63
3.3 地震荷载与风荷载	68
3.3.1 地震荷载	68
3.3.2 风荷载	75
3.3.3 荷载与损伤控制	78
3.4 损伤控制结构的基本分析	80
3.4.1 分析步骤	80
3.4.2 将多自由度体系简化为等效单自由度体系	83
3.4.3 基于能量平衡的弹性最大地震反应预测	85
3.4.4 等效线性化法	86
3.4.5 基于能量平衡的地震反应分析	90
参考文献	91

第4章 损伤控制结构基本分析中的结构动力学

4.1 基于能量的抗震设计理论	93
4.2 损伤控制结构的抗震设计方法	94
4.3 基于弯剪型集中质量模型的高层建筑动力反应分析	96
4.3.1 集中质量剪切层模型	96
4.3.2 集中质量弯剪层模型	98

4.3.3	修正的集中质量弯剪层模型	99
4.3.4	考虑滞回型和黏滞型阻尼器影响的刚度矩阵	101
4.3.5	修正的弯剪层模型的运动方程	102
4.3.6	运动方程的数值解法	105
4.4	主体结构的最优刚度分布	106
4.4.1	高层建筑基于一阶振型的最优刚度分布	106
4.4.2	高层建筑考虑高阶振型影响的最优刚度分布	113
4.4.3	通过构件尺寸及布置确定建筑结构整体刚度的方法	119
4.4.4	具有最优刚度分布建筑物的基本周期的估算公式	120
参考文献		121

第5章 损伤控制设计的应用与讨论

5.1	结构概念设计	123
5.1.1	结构概念设计与损伤控制	123
5.1.2	设计流程	134
5.2	设计准则	134
5.2.1	性能化设计与性能目标	134
5.2.2	设计准则	137
5.3	损伤控制结构的设计	140
5.3.1	设计流程	140
5.3.2	地震作用	141
5.3.3	风荷载	142
5.4	计算分析	144
5.4.1	抗震设计实例	144
5.4.2	抗风设计实例	156
5.5	损伤控制结构试验	169
5.5.1	子结构试验	169
5.5.2	阻尼器的疲劳试验	176
5.5.3	风洞试验	184
参考文献		198

第6章 地震风险管理

6.1	地震危险性与地震危害性	200
6.2	地震风险管理的基本步骤	200
6.3	确认地震危险性	201