



郑建波 著

钢筋混凝土框架结构 抗震性能指标研究



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

钢筋混凝土框架结构抗震 性能指标研究

郑建波 著

中国海洋大学出版社

• 青岛 •

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土框架结构抗震性能指标研究 / 郑建波著.
—青岛:中国海洋大学出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-5670-1555-5

I. ①钢… II. ①郑… III. ①钢筋混凝土框架—
框架结构—抗震性能—性能指标—研究 IV. ①TU375.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 210372 号

出版发行	中国海洋大学出版社	
社 址	青岛市香港东路 23 号	邮政编码 266071
出 版 人	杨立敏	
网 址	http://www.ouc-press.com	
电子信箱	1079285664@qq.com	
订购电话	0532—82032573(传真)	
责任编辑	郑雪姣	电 话 0532—85901092
印 制	潍坊鲁邦工贸有限公司	
版 次	2017 年 10 月第 1 版	
印 次	2017 年 10 月第 1 次印刷	
成品尺寸	170 mm×230 mm	
印 数	1—1000	
印 张	6.25	
字 数	105	
定 价	28.00 元	

发现印刷质量问题,请致电 18663037500,由印刷厂负责调换。

前 言

我国是世界上地震灾害最严重的国家之一。为了减少地震造成的人员伤亡和经济损失,为社会的可持续发展创造一个良好、安全的环境,我们应该根据国家的基本国情开展基于性能的抗震设计理论研究。本书以我国目前应用较为广泛的钢筋混凝土框架结构为研究对象,从构件和结构楼层两个层次分别对用于评价结构在地震作用下损伤程度的性能指标进行了研究,为基于位移的地震损伤控制设计提供了理论基础。

本书首先对现有的用于评价结构构件在地震作用下损伤程度的损伤模型进行了总结与分析。然后基于太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)关于钢筋混凝土柱的试验数据库,对 Park-Ang 双参数损伤模型进行了修正,修正后的双参数损伤模型提高了损伤指标的计算精度。在此基础上对损伤指标中的位移项和能量项对损伤指标的影响程度进行了对比分析,指出位移项是影响损伤指标的主要因素,能量项对损伤指标的影响程度比较小,但仍不能忽略能量项的作用。

其次,本书在参考国内外建筑抗震规范及现有研究成果的基础上,将钢筋混凝土框架结构抗震性能等级划定为五个等级。采用修正后的损伤模型确定构件各损伤特征点对应的损伤指标,从结构构件层次对抗震性能等级进行了量化。参考国内外相关研究成果,确定对应于各性能等级的层间位移角限值,从结构楼层的层次对抗震性能等级进行了量化。

最后,本书以轴压比、剪跨比、纵筋配筋率和配箍率为主要设计参数,进行了钢筋混凝土构件(梁、柱)的低周反复加载试验。从试验宏观现象中得到了构件在地震作用下损伤破坏的全过程:混凝土开裂—纵筋受拉屈服—混凝土保护层边缘压碎—混凝土保护层剥落—核心区混凝土边缘压碎—纵筋断裂(压屈)。根据试验结果,对比研究了轴压比、配箍率、剪跨比、纵筋配筋率对构件抗震性能的影响。采用修正后的损伤模型确定各构件损伤特征点对应的损伤指标,从试验角度验证了所建立的抗震性能等级是合理的。

本书的撰写得益于以下课题的支持:

1. 国家自然科学基金项目(编号:50708081):“钢筋混凝土结构基于位移的地震损伤控制设计研究”。

2. 国家重点基础研究发展计划项目(编号:2007CB714202):“973”课题“城市多龄期建筑的地震破坏过程与倒塌机制”。

本书作者师从同济大学蒋欢军教授,从事混凝土结构抗震设计、土木工程教学、科研等工作,特别感谢蒋欢军教授对本书内容的指导以及审核和校对,作者从老师严谨的工作态度和豁达的生活态度中学到了很多,向老师致敬!

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请各位专家读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 国内外研究现状	(4)
1.3 研究意义	(6)
1.4 主要内容	(6)
第二章 钢筋混凝土构件损伤模型的发展与研究现状	(8)
2.1 结构的地震损伤破坏机理	(8)
2.2 损伤的基本概念	(8)
2.3 单参数损伤模型	(9)
2.4 多参数损伤模型	(13)
2.5 本章小结	(15)
第三章 对 Park-Ang 双参数损伤模型的修正	(16)
3.1 概述	(16)
3.2 选用的钢筋混凝土柱试验结果数据库	(17)
3.3 修正后的双参数损伤模型	(21)
3.4 本章小结	(29)
第四章 钢筋混凝土框架结构抗震性能等级的划分	(30)
4.1 结构的破坏状态	(30)
4.2 抗震性能等级的划分	(31)
4.3 本章小结	(38)
第五章 钢筋混凝土构件地震损伤机理试验研究	(39)
5.1 概述	(39)
5.2 试验概述	(40)
5.3 试验现象描述	(47)
5.4 本章小结	(73)

第六章 试验数据处理及抗震性能等级的试验验证	(75)
6.1 概述	(75)
6.2 荷载-位移滞回曲线	(75)
6.3 骨架曲线分析比较	(77)
6.4 加载特征点的确定与比较	(80)
6.5 混凝土保护层的损伤破坏情况	(83)
6.6 各损伤特征点裂缝开展情况	(84)
6.7 钢筋混凝土框架结构抗震性能等级的试验验证	(85)
6.8 本章小结	(86)
第七章 结论与展望	(87)
7.1 本书的主要研究成果	(87)
7.2 建议及展望	(87)
参考文献	(89)

第一章 绪 论

1.1 概述

地震是人类面临的最主要自然灾害之一。经过近一个世纪的努力,通过对建筑物的抗震设防,人们已经可以有效地控制建筑物的倒塌,减少地震所造成的人员伤亡。但是在总结近年来发生的地震灾害时,特别是 20 世纪 90 年代以来发生的震害时,人们惊奇地发现按现行规范设计的各种建筑物在地震中虽然基本保证了生命安全,但是在控制地震造成的经济损失上却显得力不从心,地震震害最显著的特点是地震灾害损失呈上升的趋势,如 1994 年美国 Northridge 地震(经济损失 200 亿美元)、1995 年日本神户地震(经济损失 1 000 亿美元)、1999 年中国台湾集集地震(经济损失 3 766 亿新台币)、2008 年中国汶川地震(经济损失 8 451 亿元人民币),给社会造成了极大的经济负担。这些震害表明现行的以保证人的生命安全为原则的一级设计理论在抗震设计理念、满足社会需求等方面还存在着较多问题。随着经济的发展和城市化程度的提高,人口和财富在有限空间的高度集中,建筑物日益庞大和复杂,地震灾害已给城市的可持续发展带来了巨大的威胁。若不采取新思路、新方法、新技术,今后地震造成的经济损失会越来越严重。同时,这些震害也促使了地质工作学者对现行的抗震设计体系进行重新评价和深刻反思。事实上,在地震作用不大的情况下之所以造成巨大的经济损失,主要是由于建筑的功能因结构的地震损伤而受到了影响或破坏。而目前世界上大部分国家现行的以保证人的生命安全为原则的抗震设计方法是基于承载力或强度的设计方法,不能对结构的地震损伤及由此导致的经济损失进行有效控制,不能对建筑物在未来的地震中表现出的抗震性能做出正确评估,并且忽视了对建筑物中非结构构件和内部设施(建筑功能)的保护。

基于上述问题的深刻反思,20 世纪 90 年代初美国科学家率先提出了基于性能的抗震设计思想(performance-based seismic design, PBSD),并在政府的资助下启动了许多相关科研项目。基于性能的抗震设计理论是指根据建筑物的用途和重要性以及地震设防水准确定建筑物的抗震性能目标,按照该目标进行建筑抗震设计,使设计的建筑在未来可能发生的地震作用下具有预期的抗震性能和安全度,从而将建筑的震害损失控制在预期的范围内。基于性能的抗震设计思想是抗

震设计理论的一次变革,受到了世界各国地震工程学者的广泛关注,目前已得到了工程界的广泛认同。美国、日本、新西兰和欧洲各国学者纷纷开展这方面的研究,把基于性能的抗震设计理论作为改进现有抗震设计理念、制定新一代抗震设计规范的主要理论基础。我国也于 20 世纪 90 年代末开始了有关理论的研究工作。目前该理论在实践中已开始用于现有结构的抗震性能评估和抗震加固设计。

下面针对传统的抗震设计方法与基于性能的抗震设计方法进行对比阐述。

1.1.1 传统抗震设计思想及方法

考察目前世界各国抗震设计规范,大多数国家均以“小震不坏、中震可修、大震不倒”作为抗震设计思想,我国 2001 年的新《建筑抗震设计规范》也是如此。为实现上述三水准抗震设防要求,各国采取了不同的设计方法,但均大同小异。我国是采用二阶段抗震设计方法来保障对大量的一般工业和民用建筑实现其三水准的抗震设防要求,同时以此方法为基础通过对建筑物进行抗震重要性分类(甲、乙、丙、丁四类)来区别不同类别的建筑并采取相应的修正方法来满足不同的抗震设防要求。这两阶段设计方法是:第一阶段进行强度验算,取第一水准烈度(小震)的地震动参数,用弹性反应谱计算结构的弹性地震作用及效应,并与其他荷载效应组合,对构件截面进行抗震承载力验算,以保证必要的强度可靠度要求;再通过合理的结构布置和有关的构造措施,保证结构具有必要的变形能力。第二阶段进行弹塑性验算,对特别重要的建筑和地震时易倒塌的结构,要按第三水准烈度(大震)的地震动参数进行薄弱层(部位)的弹塑性变形验算,并采用相应的构造措施以满足“大震不倒”的设防要求。

归纳起来,传统抗震设计思想及其方法具有如下五个特点:

三水准抗震设计思想是以保障人民生命安全为基本目标的,因此与现代建筑所蕴含的经济、社会、政治等多方面功能无法适应。

三水准抗震设计思想对结构的功能要求规定过于泛化,因而无法满足投资者、业主或环境对其功能上的“个性”要求。

三水准抗震设计思想对三级设防水准小震、中震、大震用不同的 50 年基准期内的超越概率(分别为 63.2%、10%和 2%~3%)来定义,且以各地地震基本烈度为基础反映,在应用上不方便。

二阶段抗震设计方法中对地震作用(包括弹性和弹塑性)的计算是以加速度反应谱作为其基本的表达方式,它无法解决地面运动长周期成分所引起的结构的速度和位移响应问题。

二阶段抗震设计方法所采用的基于概率的极限状态设计思想,其可靠度只局

限在构件层次,且采用分项系数来保证可靠度。显然,由此得到的结构体系的可靠度会分布在一个很大的范围内。

基于现有建筑结构抗震设计规范的缺陷及存在的问题,为了更好地满足社会和公众对结构抗震性能的多种需求,美国联邦紧急救援署(FEMA)和国家自然科学基金会(NSF)资助开展了一项为期6年的行动计划,对未来的抗震设计进行了多方面的基础性研究,提出了基于性能的抗震设计理论,包括设计理论的框架、性能水准的定性与定量描述、结构非线性分析方法。日本、新西兰、欧洲各国、加拿大、澳大利亚相继开展了基于性能的结构抗震设计理论的研究。2000年11月15日,这些国家的地震工程研究人员汇集日本国土交通省建筑研究所,就基于性能的结构抗震设计理论的概念性框架、荷载与反应、抗震设计等主要内容进行了学术交流。可以肯定地说,基于性能的结构抗震设计理论已成为这些国家地震工程研究的热门课题。我国在该领域的研究是近几年的事,主要集中在如何消化国外研究成果,这在新的《建筑结构抗震设计规范》中得到了一定程度的体现。我国工程抗震界普遍认为,中国21世纪的抗震设计规范应顺应国际发展,发展适合国情的、基于性能的结构抗震设计理论。

1.1.2 基于性能的抗震设计概念

如上所述,传统的抗震设计思想及方法无法满足人们对结构抗震功能的深层次要求。为此,近年来各国学者纷纷关注如何更好的强化结构抗震的安全目标和提高结构抗震的功能要求,并已在理论研究乃至设计实践中实现了以下三个方面的转变:①以力分析为主→兼顾力和变形→全面考虑力、变形、损伤、耗能;②线性分析→非线性分析;③确定性分析→可靠性分析。在此基础上,20世纪90年代初,美国学者提出了基于性能的抗震设计概念,并立即引起了世界范围同行的极大兴趣和广泛研究。它的思想内核是:将抗震设计以保障人民生命安全为基本目标转化为在不同风险水平地震作用下满足不同的性能目标,从而通过多目标、多层次的抗震安全设计来最大限度保障人民生命安全和实现“效益—投资”的优化平衡以及满足对结构“个性”的要求。显然,这一思想是在总结传统设计思想的基础上以概念化的形式加以发展的,而并非是对传统设计思想的革命。事实上,传统的三水准抗震设计思想也具有基于性能的抗震设计思想的因素,只不过是处于初级的、低水平的、目标不明确的层面上而已。在基于性能的抗震设计这一概念明确提出以后,已有的研究成果(如前述的三个方面的转变)便可纳入其中,再加上更多系统的、有目的的研究,从而形成一个科学而又开放的体系。这对各国修改和完善抗震规范具有很好的指导作用。目前,世界许多国家都对基于性能的抗震设计进行了广泛而细致的研究,以期将其尽快地应用到新的抗震规范中去。

我国在 2001 年的《建筑抗震设计规范》中也体现了一些这一思想。

要实现基于性能的抗震设计思想,必须对结构在地震作用下的损伤进行有效控制。实际震害和理论分析都表明,地震导致的结构变形是结构构件和非结构构件破损的主要原因,结构的破坏程度与结构的变形(耗能)能力和位移响应密切相关,变形指标比强度指标更能反映结构在地震作用下的性能。将变形作为抗震结构性能的参数,还可以对结构的整体行为进行合理的控制。因此,国内外学者对基于性能的抗震设计理论的研究主要集中在基于位移(变形)的抗震设计上,基于位移的抗震设计方法被公认为是现阶段实现基于性能的抗震设计最为便捷的一条途径。

1.2 国内外研究现状

1981 年 Sozen^[1]首先系统的阐述了控制结构位移的抗震设计思想,认为结构的层间位移是直接影响结构和非结构构件损伤破坏程度的主要因素,设计人员在进行抗震设计时应采用位移参数来选择经济有效的抗震结构体系。他所提出的设计思想并没有提供足够的信息来指导设计人员直接把位移的计算与结构反应需求联系起来,因而只能称其为基于位移的概念设计。20 世纪 60 年代,Newmark^[2]首先注意到具有良好变形能力的结构可以在较小承载力的情况下承受较大的地震作用,并研究了单自由度弹塑性系统与对应的弹性系统在地震作用下位移反应之间的关系。20 世纪 80 年代,随着“小震不坏、中震可修、大震不倒”的多水准抗震设计理念在抗震规范中实施,许多国家的抗震规范都规定了对结构进行层间位移角验算。这个阶段位移验算是对强度设计方法的补充,但位移并不作为控制参数直接参与设计。1991 年 Qi 和 Moehle 正式提出了基于位移的抗震设计方法,用于钢筋混凝土结构的设计^[3]。该方法以位移作为设计参数,通过控制结构的位移反应来控制结构的破坏。1995 年 Calvi^[4]和 Kowalsky^[5]分别提出了直接基于位移的方法用于多自由度规则桥梁和钢筋混凝土桥墩的抗震设计。自此开始,基于位移的抗震设计方法受到了国内外学者的广泛关注,纷纷开展这方面的研究。根据已有研究成果,基于位移的抗震设计方法可归纳为以下两类。

(1) 传统的基于承载力(强度)的抗震设计与抗震性能检验相结合的方法。

先采用传统的基于承载力的设计方法对结构进行初步设计,然后采用静力弹塑性法(即推覆分析)对结构的抗震性能进行检验与评估,若不满足性能目标则需修改设计,重新迭代计算。其中研究和应用最多的是能力谱法。该方法最早由 Freeman 等人提出,后又经过了 Fajfar 等一些学者的改进和发展^[6]。该方法是通过地震反应谱与能力谱的比较来检验结构在给定地震作用下的抗震性能。由于地震变形需求的计算是该方法的关键,近年的研究主要集中在如何提高地震变

形需求的计算精度,特别是对传统推覆法的不断改进,代表性的有:Gupta 提出了基于适应性反应谱的推覆分析,在推覆过程中不断根据变化了的刚度调整侧向力的分布模式^[7],但计算量很大;Chopra 提出了模态推覆分析方法,结构的地震需求通过各模态的推覆分析结果组合得到,以考虑高阶振型的影响^[8];Kalkan 结合上述两种方法提出了适应性的模态组合法^[9]。此外,部分研究集中在对结构地震变形需求的分布规律、影响因素及求解方法上^[10, 11]。

该方法的实质是在传统的基于强度的抗震设计基础上对结构进行抗震性能的校核,用于设计往往需要多次迭代,使用不方便,从严格意义上来说是一种准性能设计方法,更适用于已有结构抗震性能的评估和新设计结构抗震性能的校核。

(2) 直接基于位移的抗震设计方法。

该方法是由 Calvi^[4]和 Kowalsky^[5]提出,先用于钢筋混凝土单自由度结构的抗震设计,后用于钢筋混凝土多自由度桥梁和建筑结构的抗震设计。随后一些学者又对该方法进行了进一步的完善和发展,其中代表性的有: Priestley 提出了通过限制结构材料应变来控制结构构件损伤及考虑土-结构相互作用的基于位移的抗震设计方法^[12];Xue 采用 Newmark-Hall 折减系数从能力谱中得到了非线性地震需求,将位移和延性同时作为设计目标^[13];Kowalsky 提出了有效模态形状的概念,在确定目标位移时采用反应谱的振型组合来反应高阶振型的影响^[14];Browning 提出了利用位移反应谱及位移角限值确定目标周期^[15];Aschheim 提出了屈服点谱,根据目标位移角和延性限值确定屈服强度^[16];SEAOC 蓝皮书提出了五个与位移限值相对应的性能等级用于直接基于位移的抗震设计^[17]。由于非线性地震反应谱是基于位移的抗震设计方法的基础,近年来的研究又主要集中在考虑地震动特性、场地条件及结构特性等因素的非线性反应谱上,如非线性位移反应谱、延性需求谱、能量需求谱等^[18~20]。

该方法在设计开始时就明确了结构的性能目标,直接把位移作为抗震性能指标和结构设计参数,使基于性能的抗震设计方法得到了很大简化,更具有实际的可操作性,比前一种方法更适用于基于性能的抗震设计。

国内情况:我国基于性能的抗震设计理论研究始于 20 世纪 90 年代末,把基于结构性能设计理论引入到结构优化设计领域,提出基于性能的抗震优化设计概念。1999 年 10 月,在清华大学举行了高层建筑抗震设计新方法国际研讨会“International Seminar on New Seismic Design Methodologies For Tall Buildings”研讨会,与会学者对基于性能的结构抗震设计进行了广泛地交流和讨论。近年来,随着研究的深入,取得了一定的研究成果,2004 年颁布了《建筑工程抗震性态设计通则》,体现了基于性能的抗震设计研究的最新进展,为下一代抗震设计规范

的编制提供了一个新的模式。近年来,我国基于位移的抗震设计研究成果主要体现在以下几个方面:(1) 对非线性反应谱的研究,主要包括对非弹性位移设计谱^[21]、等延性地震抗力谱^[22]、Ay-Dy 格式(屈服谱加速度屈服位移格式)的地震需求谱^[23]、特征延性谱^[24]和延性需求谱^[25]的研究;(2) 对目标位移和位移模式的研究,吴波等^[26]提出了直接基于位移可靠度的抗震设计中层间目标屈服位移的计算公式,田野等^[27]用框架梁节点截面屈服时的位移作为目标位移,推导了层间屈服位移的计算公式,梁兴文等^[28]提出了用作用倒三角形水平分布荷载的等截面悬臂柱的侧移曲线作为框架结构的初始侧移模式;(3) 对设计方法的研究,主要包括钢筋混凝土桥墩^[29]、钢筋混凝土框架梁^[30]、框架柱^[31]及剪力墙^[32]直接基于位移的抗震设计方法和基于改进能力谱的地震损伤性能设计方法^[33]。

目前基于位移的抗震设计方法要在工程实际中得以应用,尚有不少问题有待进一步研究:性能指标研究不够全面、深入,性能等级的划分比较模糊、粗糙,定性的描述多于定量的界定,缺乏足够的试验资料和震害资料;对于结构构件,往往忽略地震持续时间带来的累积损伤的影响,而事实上累积损伤对结构的抗震性能有较大的影响,特别对于钢筋混凝土结构,由于低周疲劳引起的结构性能(刚度、强度、变形能力等)的退化十分明显,只通过限制其位移或延性还不足以实现对地震损伤的有效控制^[34];对非结构构件,由于构件种类繁多,相关研究远落后于结构构件的研究,未能建立一套系统、统一的损伤标准。

1.3 研究意义

我国是世界上地震灾害最严重的国家之一。为了减少地震造成的人员伤亡和经济损失,为社会的可持续发展创造一个良好、安全的环境,我们应该根据国家的基本国情开展基于性能的抗震设计理论研究。采用基于性能的抗震设计理论有利于与国际间建立统一的建筑设计标准,扩大与国外的交流与合作。

本书以我国目前应用较为广泛的钢筋混凝土框架结构为研究对象,分别从结构构件和结构楼层两个层次对钢筋混凝土框架结构的抗震性能等级进行量化,为基于位移的地震损伤控制设计提供基础支持。

1.4 主要内容

钢筋混凝土框架结构是一种在实际工程中被广泛采用的抗震结构体系,大量震害资料表明框架结构的整体破坏(倒塌),大多是由于底层柱或者薄弱层柱的塑性铰损伤累积到一定程度而丧失竖向或水平承载能力而引起的。因此,本书的研究重点是钢筋混凝土框架结构构件(梁、柱)的地震损伤破坏机理。本课题研究思路为:以 Park-Ang 双参数损伤模型为代表的考虑最大变形和累积塑性耗能引起损伤的损伤模型为基础,通过整理和分析已有研究成果及适量补充试验确定应用

于本课题的地震损伤指标,研究该损伤指标与构件破坏状态的对应关系,结合层间位移角建立钢筋混凝土框架结构的抗震性能等级。

本书的主要内容如下:

1. 基于加州大学 Berkley 分校太平洋地震工程研究中心(Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER)建立的钢筋混凝土柱试验数据库,选取符合一定条件的试验数据对 Park-Ang 双参数损伤模型进行修正,明确相关参数取值,确定应用于本书的损伤模型;

2. 参考国内外建筑结构抗震规范及已有研究成果,建立钢筋混凝土框架结构的抗震性能等级;以损伤指标和层间位移角为主要性能指标,从构件和结构楼层两个层次对抗震性能等级进行量化;

3. 设计并完成钢筋混凝土梁、柱低周反复加载试验,详细观察、记录试验过程中构件损伤破坏的情况;

4. 整理分析试验数据,对比研究轴压比、剪跨比、纵筋配筋率和配箍率四个参数对构件抗震性能的影响;

5. 基于钢筋混凝土梁、柱低周反复加载试验数据,采用修正后的损伤模型确定各试件损伤特征点对应的损伤指标,从试验角度验证所建立的抗震性能等级中用于评价结构构件损伤程度的性能指标是否合理。

第二章 钢筋混凝土构件损伤模型的发展与研究现状

2.1 结构的地震损伤破坏机理

地震作用下的结构反应主要取决于地震动特性和结构自身的动力特性。地震动三要素(振幅、频谱、持时)的不同组合,使得结构呈现出不同的破坏形式。大量试验和理论研究表明,钢筋混凝土结构在地震作用下的破坏主要是通过首次超越破坏和累积损伤破坏两种途径实现的^[35]。第一种途径是当应力或应变超过某个限值后,损伤将随着力的单调增长而发展,当应力或应变累积增大到一定程度后结构突然发生破坏。第二种途径是在循环加载过程中,由应力或应变的增长导致的损伤尚不足以造成构件失效破坏时,由于反复的振动作用,使得结构性能(强度、刚度等)不断退化,构件损伤随变形循环次数的增加不断增长,主要包括混凝土和钢筋本身的损伤累积,以及它们之间的黏结效应和裂缝界面效应的损伤累积。

目前国内外对结构地震损伤破坏机理的总体认识是:结构最大反应和累积损伤是相互影响的,随着结构累积损伤的增加,结构最大反应破坏的控制界限将逐渐下降;随着结构最大反应的增大,结构累积损伤破坏的控制界限也将逐渐下降。在一定程度上反映了地震动三要素对结构破坏的影响。

为了达到保证生命安全,控制结构破损程度,使财产损失控制在可以接受范围内的目的,这就要求在实际设计工作中,针对不同抗震设防水准,保证结构具有明确的性能水平。结构的性能与结构的损伤破坏状态相关联,而结构的损伤破坏状态又可由结构的反应参数或者某些定义的损伤指标来确定,所以结构性能水平可以用某种定义的损伤指标加以划分。研究人员通过各类钢筋混凝土构件在反复荷载作用下直至破坏的试验结果,建立了评价构件在不同位移幅值循环下是否发生破坏的判别模型。

2.2 损伤的基本概念

为了反映结构或构件的损伤程度,就需要选择一个或者多个反应量来评价结构或构件的损伤程度,这些反应量被称为损伤变量 d 。损伤模型以损伤指标 D 作为评价结构或者构件损伤情况的标志,损伤指标 D 是各损伤变量 d 的函数。损伤指标 D 的取值应在 $[0, 1]$ 之间,当损伤指标 $D=0$ 时,表示结构或构件没有损

伤;当 $D=1$ 时,表示结构或构件已经破坏;当 $0 < D < 1$ 时,意味着结构或构件处于无损伤和破坏之间的某种损伤状态。

损伤变量 d 是结构或构件在损伤破坏过程中的反应量,可以是应变或者曲率;或者是位移量,如杆端转角、层间水平位移等;也可以是力,如层间剪力、构件抗力等。此外,钢筋混凝土结构或构件在反复循环加载过程中所耗散的能量也可以作为损伤变量。

损伤指标 D 是损伤变量 d 的函数,损伤指标表达式中可以包含一个或多个损伤变量。图 2.1 给出的是损伤指标 D 与单个损伤变量 d 的对应关系。Oliveria (1977)、Powell 和 Allahabadi(1988)等^[36]先后提出损伤指标与损伤变量间的推断性函数关系为:

$$D = \frac{(d_{at} - d_0)^\alpha}{(d_u - d_0)^\alpha} \quad (2.1)$$

式中, d_{at} 为要计算的结构或构件的损伤变量, d_0 为损伤变量的阈值, d_u 为结构或构件破坏时的损伤变量, α 为离散性指数(试验数据不充分时取 1)。如果 $d_{at} < d_0$,则表示结构或构件处于弹性变形状态,没有残余变形,结构或构件没有损伤。

结构构件的损伤模型可以预测结构各受力构件在地震作用下非弹性反应历程中是否丧失承载能力,即对应的损伤指标 $D=1$ 的情况。国内外许多研究者基于不同的假设,提出了多种不同的损伤模型。总结起来可以

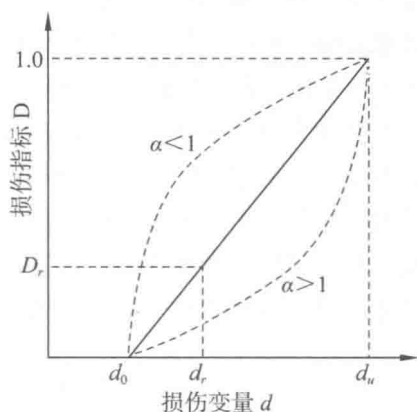


图 2.1 损伤指标与损伤变量的关系

用不同的分类标准进行分类,如根据确定损伤指标的数学理论方法的不同,损伤模型可以划分为确定性损伤模型和非确定性损伤模型;根据分析目的的不同,可以划分为结构损伤模型和经济损伤模型;根据研究的层次对象,可以划分为材料、构件和结构三个层次的损伤模型。本书主要研究的是构件层次的损伤模型。

随着对损伤规律的深入研究,对钢筋混凝土构件损伤模型的研究大致经历了单参数损伤模型和多参数损伤模型两个发展阶段。

2.3 单参数损伤模型

单参数损伤模型是根据单一的破坏参数(延性、位移、变形等)以及相应的容许极限能力建立的损伤模型,基本表达式是:

$$D = f(\sigma_e, \sigma_u) \quad (2.2)$$

式中, σ_c 、 σ_u 分别是破坏参数的计算值和容许极限值。当 $D \geq 1$ 时, 表示结构完全破坏; 当 $D = 0$ 时, 表示结构没有损伤; 当 $0 < D < 1$ 时, 表示结构处于损伤状态。

单参数损伤模型是基于在结构抗震理论的静力阶段和弹性反应谱阶段对地震动和结构性能的认识基础上提出的。总结已有研究成果, 现对单参数损伤模型总结如下:

2.3.1 以强度准则建立的损伤模型

强度损伤模型是应用最广的传统损伤模型, 是指按结构动力或者等效静力方法求出构件的最大内力达到其承载能力时, 就认为结构破坏。

强度损伤模型对结构在小震作用下的分析与设计是必不可少的, 但单一的强度损伤模型一般不能准确反映结构的抗震性能。在结构抗震设计时, 出于经济方面的考虑, 通常允许结构在预期的强震动作用下发生非弹性变形, 而强度损伤模型只能反映结构的弹性性能, 无法反映结构进入弹塑性工作状态时的非线性力学性质, 因此该模型只适用于“小震不坏”的抗震设计。

2.3.2 基于延性的损伤模型

基于大量试验和震害分析, 研究学者发现结构或构件的破坏主要是由于超限的变形引起的, 并从实际震害和结构试验分析中得到一定的变形破坏指标, 常用的有结构延性系数和层间位移角。相比以强度为损伤变量的损伤模型更为直接地反映了结构在地震作用下的实际受力状态。假定结构或构件在单调加载下的最大延性是地震作用下的延性极限, 则基于延性的损伤模型为:

$$D = \frac{\mu_m - 1}{\mu_{u, mon} - 1} \quad (2.3)$$

式中, $\mu_m = x_{\max} / x_y$, $\mu_{u, mon} = x_{u, mon} / x_y$, $x_{\max}$ 、 $x_{u, mon}$ 、 x_y 分别表示结构或构件在地震作用下的最大变形、单调荷载作用下的极限变形和屈服变形。

延性损伤模型只反映了地震动振幅和频谱及结构或构件非线性反应的影响, 并没有反映地震动持续时间对结构或构件的累积损伤作用。实际上延性损伤模型是在结构或构件一次达到的延性水平与多次反复达到该延性水平所造成的损伤程度相同这一假定条件下建立的, 无法反映循环加载效应引起的刚度和强度退化的影响。

2.3.3 Miner 线性累积损伤模型

1945 年, Miner^[37] 根据金属的高周疲劳理论提出了 Palmgen-Miner 线性累积损伤模型, 在材料疲劳损伤研究领域受到广泛的重视, 并得到了广泛的应用。该模型假定:

(1) 如果在应力(变形)水平 S_i 作用下, 构件疲劳寿命为 N_i , 则当在应力(变