

工程结构非弹性地震动力反应 分析与参数识别

——BWBN模型的基本理论与程序设计

余波 宁超列/著



科学出版社

工程结构非弹性地震动力反应 分析与参数识别

——BWBN模型的基本理论与程序设计

余波 宁超列/著

科学出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

工程结构非弹性地震动力反应分析与参数识别: BWBN 模型的基本理论与程序设计/余波, 宁超列著. —北京: 科学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-03-047405-6

I. ①工… II. ①余… ②宁… III. ①工程结构-地震反应分析-系统模型
IV. ①TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 036357 号

责任编辑: 郭勇斌 肖 雷 / 责任校对: 郑金红
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 240 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来,世界各地的地震灾害频发,造成巨大的人员伤亡和财产损失。强烈地震作用通常使工程结构发生屈服而进入非弹性变形阶段。由于结构进入非弹性变形阶段后,其刚度和自振周期都会发生改变,所以利用常规的线弹性分析理论和计算方法难以准确分析工程结构的非弹性地震动力反应。因此,强震作用下工程结构的非弹性地震动力反应分析,成为工程结构抗震设计和抗震性能评估的关键。同时,木、砖石和钢筋混凝土结构在强震作用下的恢复力—位移滞回曲线通常表现出明显的强度退化、刚度退化和捏拢效应等滞回特性,利用传统的理想弹塑性、双线性或三线性恢复力模型,难以有效描述工程结构的上述典型滞回特性。因此,建立一种能够有效处理强度退化、刚度退化和捏拢效应等滞回特性的非弹性地震动力反应分析模型,并根据结构或构件的拟静力往复加载试验数据高效、准确地识别模型参数,对于工程结构的非弹性地震动力反应分析与地震易损性分析等具有重要的理论指导意义和工程应用价值。

由于Bouc-Wen-Baber-Noori(BWBN)模型能够较好地描述工程结构中广泛存在的强度退化、刚度退化和捏拢效应等因素的影响,所以近年来在地震工程与结构工程领域得到快速发展。本书不仅详细推导了单轴、双轴和平扭耦联BWBN模型的运动控制方程、非弹性恢复力以及切线/割线刚度的数值解法,而且介绍了该模型的参数灵敏度分析与参数识别方法,并提供了相应的程序源代码和分析软件,相关工作将有助于推动BWBN模型在结构非弹性地震动力反应分析中的应用与发展。

本书汇聚了作者近年来在结构地震动力反应分析与结构抗震设计方面的最新研究成果,部分研究工作得到了国家自然科学基金项目(51368006)、人力资源社会保障部留学人员科技活动择优资助项目([2012]-258)、广西自然科学基金重大项目(2012GXNSFEA053002)、广西自然科学基金青年基金项目(2013GXNSFBA019237)、广西高校科学技术研究项目(2013YB009)等项目的资助,对此表示衷心感谢!本书的出版得到了多位专家和学者的支持。感谢广西大学的杨绿峰教授、加拿大University of Western Ontario的洪汉平教授以及新加坡Nanyang Technological University的李兵教授等专家给予的指导和帮助!感谢硕士研究生刘迪和李长晋在书稿整理过程中提供的协助。

由于水平有限，书中难免有疏漏及不妥之处，敬请读者提出宝贵意见。同时也欢迎广大读者通过电子邮箱 (gxuyubo@gxu.edu.cn) 与作者交流。

余 波 宁超列
2015 年 8 月于广西大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 单向地震激励下的非弹性地震动力反应分析	1
1.2 双向地震激励下的非弹性地震动力反应分析	3
1.3 平扭耦联作用下的非弹性地震动力反应分析	5
1.4 结构非弹性地震动力反应分析模型的参数识别	7
1.5 内容框架	8
参考文献	9
第 2 章 结构非弹性地震动力反应分析的单轴 BWBN 模型	15
2.1 引言	15
2.2 单轴 BWBN 模型的运动控制方程	15
2.3 单轴 BWBN 模型的恢复力和刚度	19
2.4 单轴 BWBN 模型运动控制方程的求解	38
2.5 非弹性恢复力与刚度的对比分析	44
2.6 影响因素分析	45
2.7 小结	54
参考文献	55
第 3 章 结构非弹性地震动力反应分析的双轴 BWBN 模型	57
3.1 引言	57
3.2 双轴 BWBN 模型的运动控制方程	57
3.3 双轴 BWBN 模型的非弹性恢复力与割线刚度	61
3.4 双轴 BWBN 模型运动控制方程的求解	69
3.5 影响因素分析	77
3.6 小结	89
参考文献	90
第 4 章 结构非弹性地震动力反应分析的平扭耦联 BWBN 模型	92
4.1 引言	92
4.2 平扭耦联 BWBN 模型的运动控制方程	92
4.3 平扭耦联 BWBN 模型的非弹性恢复力与割线刚度	99

4.4	平扭耦联 BWBN 模型运动控制方程的求解	110
4.5	影响因素分析	122
4.6	小结	127
	参考文献	127
第 5 章	BWBN 模型的参数灵敏度分析与参数识别方法	130
5.1	引言	130
5.2	BWBN 模型的参数灵敏度分析	131
5.3	BWBN 模型的参数识别	144
5.4	分析与验证	158
5.5	小结	167
	参考文献	167
附录	《结构非弹性地震动力反应分析与参数识别软件》用户手册	169

第1章 绪 论

我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带的交汇处,地震断裂带发育,地震灾害频发。地震作用不仅可以直接引起工程结构的破坏或倒塌,造成严重的人员伤亡和财产损失,而且可能引起滑坡、泥石流、爆炸(或剧毒)危险化学品泄漏、水灾、火灾等一系列次生灾害,破坏人类社会赖以生存的自然环境,产生不利的社会影响。

大量的震害资料表明,强震作用通常使工程结构发生屈服而进入非弹性变形阶段。由于工程结构进入非弹性变形阶段后,其刚度和自振周期都会发生改变,所以利用常规的线弹性分析理论和计算方法难以准确分析结构的非弹性内力和变形,导致强震作用下工程结构的非弹性地震动力反应分析和抗震性能评估十分复杂。同时,木、砖石和钢筋混凝土结构在强震作用下的恢复力—位移滞回曲线通常表现出明显的强度退化、刚度退化和捏拢效应等滞回特性^[1,2]。然而,目前普遍采用的理想弹塑性、双线性或三线性恢复力模型,难以有效地反映工程结构的上述典型滞回特性^[3-6]。

由此可见,对于工程结构的抗震设计和抗震性能评估,关键在于建立一种能够有效处理强度退化、刚度退化和捏拢效应等典型滞回特性的非弹性地震动力反应分析模型,并根据结构或构件的拟静力往复加载试验数据,发展其模型参数的快速识别技术,从而为工程结构的非弹性地震动力反应分析提供方便、快捷的手段。因此,工程结构的非弹性地震动力反应分析与参数识别研究,对于工程结构的抗震设计和抗震性能评估具有重要的理论指导意义和工程应用价值。

本章首先介绍单向、双向和平扭耦联地震激励作用下,工程结构非弹性地震动力反应分析的研究现状及其存在的关键问题,然后介绍结构非弹性地震动力反应分析模型在参数灵敏度分析与参数识别方面的研究现状与难点。

1.1 单向地震激励下的非弹性地震动力反应分析

在单向地震激励作用下,单自由度体系的非弹性地震动力反应分析是结构抗震设计和抗震性能评估的基础^[7-9]。在单向地震激励作用下,非弹性单自由度体系在某一时刻的恢复力不仅与该时刻的瞬时变形有关,而且与整个变形过程有关,即具有记忆特性。通常将这种记忆特性称为恢复力与位移之间的滞回特性^[10,11]。目前,工程结构的恢复力模型众多,典型的包括理想弹塑性模型、双线性模型、Clough 模型、Takeda 三线性模型、Bouc-Wen-Baber-Noori(BWBN)模型等^[1,2,12-14]。其中,由

于 BWBN 模型能够较好地描述强度退化、刚度退化和捏拢效应等滞回特性,且属于光滑曲线型模型,所以得到广泛应用。早在 20 世纪 60 年代初, Bouc^[15,16] 就提出了一种适用于单自由度体系非弹性动力反应分析的光滑滞回模型(称为 Bouc 模型),但该模型无法处理强度退化、刚度退化和捏拢效应等滞回特性,属于 BWBN 模型的雏形。20 世纪 70 年代, Wen^[17] 通过等效线性化技术对 Bouc 模型进行改进,提出了一种适用于结构随机振动分析的光滑曲线型模型(称为 Bouc-Wen 模型)。随后, Baber 和 Wen^[18] 根据累积滞回耗能准则定义刚度和强度退化参数,对 Bouc-Wen 模型进行了改进,并拓展应用于多自由度体系的非弹性动力反应分析。到 20 世纪 80 年代中期, Baber 和 Noori^[19] 进一步引入“捏拢效应”函数对 Bouc-Wen 模型进行改进,提出了一种能够综合处理强度退化、刚度退化和捏拢效应等滞回特性的光滑曲线型模型(称为 Bouc-Wen-Baber-Noori 模型,简称 BWBN 模型)。近年来, BWBN 模型得到了进一步发展,已经能够有效解决压弯耦合效应^[20]、非对称滞回特性和应变硬化效应^[21] 等问题。目前, BWBN 模型已被广泛应用于木结构的剪力墙^[22,23] 和节点^[24-26]、钢筋混凝土框架结构^[27]、钢筋混凝土梁柱节点^[28] 和剪力墙^[29] 等结构和构件中。此外, BWBN 模型还被用于概率地震延性需求^[30-32] 和震后概率残余位移^[33] 等方面的分析。

在水平地震激励作用下,工程结构通常会产生显著的水平侧向位移。当结构进入非弹性变形阶段后,其水平侧向位移会更加明显。因此,竖向地震激励和重力荷载通过上述水平侧向位移作用,会在基底产生较大的附加弯矩,而附加弯矩会进一步增大结构的水平侧向位移,甚至引起结构体系发生动力失稳。通常将竖向地震激励和重力荷载产生的上述效应称为 $P-\Delta$ 效应^[34-36]。 $P-\Delta$ 效应使结构体系的屈服后刚度出现明显的下降,导致结构由往复振动转变为单向偏移,从而明显增大结构体系的侧向位移和残余变形,进而削弱结构抵抗倒塌的能力^[4-6,34]。早期, Bernal^[37] 利用少量强震记录对理想弹塑性体系的地震动力反应进行了统计分析。分析结果表明, $P-\Delta$ 效应对结构的稳定系数和延性系数相对敏感,但对结构的自振周期相对不敏感。因此, Bernal^[37] 和 MacRae^[35] 提出通过增加结构的强度和刚度来缓解 $P-\Delta$ 效应的影响,进而保证结构的动力稳定性。然而, Tremblay^[36]、Gupta 和 Krawinkler^[4] 以及 Humar 等^[34] 的研究结果表明,在某些情况下,采用增加结构的强度或刚度的方法来缓解 $P-\Delta$ 效应的影响并不能保证结构体系的动力稳定性。此外, Gupta 和 Krawinkler^[4] 对双线性非弹性结构体系的动力 $P-\Delta$ 效应进行了讨论,发现 $P-\Delta$ 效应可以导致结构屈服后的有效刚度为负,从而增大结构发生侧向倒塌或失稳的可能性;非弹性地震动力反应对结构计算模型和地震记录特征比较敏感,特别是对于持续时间较长的强震记录, $P-\Delta$ 效应更为明显。Kalkan 和 Graizer^[6] 考虑平动和转动的耦合效应以及 $P-\Delta$ 效应,分析了双线性单自由度体系的地震延性需求,发现平动和转动耦合效应作用下的结构地震延性需求可以达到只考虑平动

作用时的 2 倍以上;此外,由转动引起的残余倾角会进一步增大 $P-\Delta$ 效应的影响,使恢复力—位移滞回曲线呈现明显的非对称偏移。另外,Williamson^[5] 利用 5 条强震记录分析了 $P-\Delta$ 效应和累积滞回耗能对双线性单自由度体系地震动力反应的影响。虽然利用 5 条强震记录的计算结果并不能完全定量地揭示结构地震动力反应的概率统计特征,但是研究表明,即便是在较小的竖向力作用下, $P-\Delta$ 效应也可能对结构的非弹性地震动力反应产生较大影响,对于短周期结构体系的影响尤为明显;同时,非弹性地震动力反应对结构体系的计算模型和地震记录特征比较敏感。Williamson 还指出,累积滞回耗能率比累积滞回耗能更能反映结构的非弹性行为,因此将极限非弹性位移单独作为判别结构地震损伤的指标是不合理的,而应同时考虑极限非弹性位移和累积滞回耗能的影响。在国内,翟长海等^[3] 讨论了 $P-\Delta$ 效应对理想弹塑性单自由度体系等延性强度需求谱的影响,发现等延性位移比随着结构自振周期的增加而减小,随着结构延性系数的增加而增大。童根树等^[38] 分析了动力 $P-\Delta$ 效应对结构动力稳定性的影响,发现结构的动力稳定性与自振周期、稳定系数和滞回模型等因素有关。

然而,上述有关 $P-\Delta$ 效应的研究大多采用理想弹塑性模型^[3] 或双线性模型^[4-6],因此难以有效地描述木、砖石和钢筋混凝土结构在强震作用下的强度退化、刚度退化以及捏拢效应等典型滞回特性与 $P-\Delta$ 效应的综合影响。鉴于此,文献 [39]、[40] 和 [41] 对经典的单轴 BWBN 模型进行改进,建立了一种可以综合处理 $P-\Delta$ 效应、强度退化、刚度退化以及捏拢效应等因素影响的新型单轴 BWBN 模型,并且定量分析了各种因素对非弹性单自由度体系的地震延性需求和地震损伤指标的影响。本书将在第 2 章介绍相关内容。

1.2 双向地震激励下的非弹性地震动力反应分析

实际工程结构大多承受双向水平地震激励作用,特殊情况下还要考虑竖向地震激励和转角激励的影响^[6]。受双向水平地震激励耦合效应的影响,非弹性体系在双向水平地震激励作用下的动力反应与单向水平地震激励作用下的动力反应具有显著差别,其根本原因在于非弹性体系沿一个方向的屈服或累积损伤往往会削弱结构体系沿另一个方向的强度和刚度,从而使双轴的恢复力—位移滞回曲线与单轴的恢复力—位移滞回曲线存在明显差异^[42-44]。因此,合理描述非弹性体系双向恢复力之间的耦合效应,是分析双向地震激励作用下非弹性体系地震动力反应分析的关键。

在试验研究方面,Takizawa 和 Aoyama^[45] 结合数值模拟和试验测试手段,分析了双向地震激励作用耦合效应对钢筋混凝土结构地震动力反应的影响,分析中分别采用圆形和菱形屈服面来描述双向恢复力之间的耦合效应。研究表明,采

用圆形屈服面能更加合理地描述双向恢复力之间的耦合效应,双向地震激励的耦合效应对具有刚度退化的三线性恢复力模型的地震动力反应影响较大,而对不具有刚度退化的双线性或三线性恢复力模型的地震动力反应影响较小。Chowdhury 等^[46]通过试验测试发现,双向循环加载下钢筋混凝土柱的弯曲变形远大于单向循环加载下的弯曲变形,所以建议在结构的地震动力反应分析中,应充分考虑双向地震激励的耦合效应,进而基于屈服面准则建立双轴的恢复力—位移滞回模型。Magliulo 和 Ramasco^[47]利用试验测试和数值分析,讨论了平面不规则钢筋混凝土框架结构在单向和双向水平地震激励作用下的动力反应,发现双向地震激励作用对结构的最大底部剪力和顶点位移影响不大,但对钢筋混凝土柱的最大非弹性变形影响显著。

在数值模拟方面, Park 和 Wen^[43,48]对经典的单轴 Bouc-Wen 模型进行改进,建立了一种可以处理双向恢复力耦合效应的双轴 Bouc-Wen 模型,并利用等效线性化法确定了双向地震激励作用下结构动力反应的统计特征值。类似地,文献 [44] 和 [49] 对经典的单轴 Bouc-Wen 模型进行改进,建立了可以处理强度退化、刚度退化、捏拢效应以及正负非对称屈服强度的双轴 Bouc-Wen 模型。此外, Wang 和 Foliente^[50]对单层和双层平面“L”型木结构的地震动力反应进行了分析,发现扭转效应和双向地震激励耦合效应对结构的非弹性地震动力反应影响较大。Stefano 和 Faella^[51]对双向水平地震激励作用下非弹性结构的地震动力反应进行了讨论,并采用椭圆形屈服面来描述双向恢复力之间的耦合效应,发现双向地震激励可以加深结构的地震损伤程度,也能够增加抗力单元的强度和刚度退化率。在国内,王东升等^[52]利用圆形屈服面来描述双向恢复力之间的耦合效应,结合 10 组地震记录对双向水平地震激励作用下理想弹塑性体系的弹塑性反应谱进行了讨论,发现增加结构较短自振周期方向的设计强度,可以在一定程度上缓解双向地震激励的不利影响。此外, Perus 和 Fajfar^[53]选用 8 组强震记录对双向地震激励作用下平面不规则结构的非弹性扭转反应进行了讨论,计算模型采用由 6 个双线性抗力单元组成的具有双轴质量偏心的单层平面不规则扭转刚性结构。研究表明,最大转角位移与最大侧向位移通常不同时发生,结构的最大整体位移不一定取决于最大转角位移或最大侧向位移,非弹性扭转效应的统计特征值比弹性扭转效应的统计特征值离散性更大。Lin 和 Tsai^[54]基于模态 Pushover 法,采用三自由度模态棒模型来分析双向地震激励作用下平面不规则结构的地震动力反应。Chao 和 Loh^[55]利用两个非弹性弹簧和一个线弹性弹簧的并联组合,建立了可以处理抗力单元强度退化、刚度退化、捏拢效应以及双向恢复力之间耦合效应的双轴滞回模型。Lee 和 Hong^[31]对经典的单轴 Bouc-Wen 模型进行改进,建立了一种能够处理双向非弹性恢复力之间耦合效应的双轴 Bouc-Wen 模型,并进一步利用 31 次地震的 381 条强震记录,分析了双向地震激励作用下双自由度体系地震延性需求的概率统计

特征。需要指出的是,当非弹性体系沿两个正交方向的刚度或屈服强度不相等时,上述方法通常需要通过一系列等价代换,将正交异性结构体系转化为等效的各向同性结构体系来分析,计算过程相对繁琐。

综上所述,受双向地震激励耦合效应的影响,非弹性体系在双向水平地震激励作用下的地震动力反应与单向水平地震激励作用下的地震动力反应具有显著差别^[42,44,55]。同时,非弹性体系在双向地震激励作用下的侧向位移相对较大,此时的 $P-\Delta$ 效应^[34-36]更为显著,往往会导致结构的屈服后刚度产生明显下降,从而明显增大结构的侧向位移和残余变形,甚至引起结构发生动力失稳^[4-6,34]。因此,有必要综合考虑 $P-\Delta$ 效应和双向水平地震激励耦合效应对非弹性双自由度体系地震动力反应的影响。鉴于此,文献[56]和[57]通过引入归一化屈服强度和归一化位移的概念,并利用归一化位移作为控制参数,以圆形屈服面来描述双向归一化恢复力之间的耦合效应,且综合考虑强度退化、刚度退化、捏拢效应等典型滞回特性和 $P-\Delta$ 效应的影响,建立了双向水平地震激励作用下非弹性双自由度体系地震动力反应分析的双轴BWBN模型,并分析了非弹性双自由度体系的地震延性需求和地震损伤指标的概率统计特征。本书将在第3章介绍相关内容。

1.3 平扭耦联作用下的非弹性地震动力反应分析

在强烈地震激励作用下,平面不规则结构通常同时发生平动和转动,导致结构平面内各抗力单元的地震延性需求不一致,从而加剧工程结构的损伤程度。通常将平面不规则结构的平动和转动之间的耦合效应称为平扭耦联效应^[53,58,59]。由于强震作用下结构的抗震性能很大程度上取决于结构能够承受的最大非弹性变形和能够提供的累积滞回耗能,所以分析平面不规则结构的非弹性变形和累积滞回耗能等地震动力反应,对于工程结构的抗震设计和抗震性能评估具有重要意义。

与平面不规则结构的线弹性扭转效应相比,非弹性扭转效应的影响因素众多,不仅与结构自身的动力特性(如归一化屈服强度、屈服后刚度比、非耦联平动自振周期、非耦联扭转平动频率比等)有关,而且受地震激励特性(如幅值、持时和频谱特性等)的影响显著^[59]。Goel和Chopra^[60]分析了非耦联扭转平动频率比和归一化刚度偏心距对平面不规则单层结构地震动力反应的影响,发现结构的弹性和非弹性扭转效应均随着归一化刚度偏心距的增加或非耦联扭转平动频率比的减小而增大。Ryan和Chopra^[61]利用20条强震记录分析了平面不规则结构基底隔震系统的地震延性需求,发现扭转效应对地震延性需求的影响与非耦联平动自振周期、归一化屈服强度、非耦联扭转平动频率比等参数的相关性较差,而随着归一化刚度偏心距的增大近似线性增加。此外,Ryan和Chopra^[62,63]采用圆形屈服面来描述双向恢复力之间的耦合效应,分析了双线性基底隔震系统的地震延性需求,发现单向

地震激励作用下的地震延性需求比双向地震激励作用下的地震延性需求小 10%~40%。Marusic 和 Fajfar^[64] 分析了双向水平地震激励作用下平面不规则结构的线弹性和非弹性地震动力效应,发现扭转效应对强震记录的特征比较敏感,结构体系沿一个方向的累积损伤可能充分影响其正交方向的动力特性。Perus 和 Fajfar^[53] 利用 8 条强震记录分析了双向水平地震激励作用下平面不规则结构的非弹性扭转效应,发现扭转效应对结构非弹性位移的影响与地震激励作用的特性有关,非弹性扭转效应的统计特征值比弹性扭转效应的统计特征值离散性更大。Lucchini 等^[58] 分析了单向水平地震激励作用下平面不规则单层结构的地震动力反应特性,发现结构的非弹性地震动力反应不仅与地震激励的特性有关,而且与结构平面内的刚度和强度分布有关。Dutta^[65] 分析了抗力单元的强度退化对平面不规则结构非弹性动力扭转效应的影响,发现抗力单元的强度退化可能引起结构的局部区域产生连续的非对称屈服和累积强度退化,从而造成强度中心连续偏移,进而不断增大平面内的强度偏心矩,最终显著增加抗力单元的地震延性需求。

近年来,理想化的单层和多层结构计算模型均被应用于平面不规则结构的线弹性和非弹性地震动力反应分析^[59]。其中,由于理想化的单层结构模型具有计算简便且能够提供足够的信息来定性分析平面不规则结构的扭转效应等优点,所以被广泛采用^[53,58-60,66-71]。Syamal 和 Pekau^[70] 基于理想化的单层结构模型,对双线性平面不规则单层结构的非弹性扭转效应进行了分析,发现当非耦联扭转平动频率比等于 1.0 时,非弹性扭转效应不会出现明显的动力放大效应,这一点与线弹性扭转效应有着显著差别。此外,Goel 和 Chopra^[69] 采用理想化的单层结构模型,研究了抗力单元的数量、位置、方向、屈服位移等因素对平面不规则结构地震动力反应的影响。Jangid 和 Datta^[72] 采用耦联的非线性微分方程,考虑双向恢复力之间的耦合效应,分析了具有基底隔震系统的平面不规则结构的平扭耦联效应。Ozaki 等^[73] 分析了双向地震激励作用下,平面不规则单层结构的非弹性地震动力反应。其中,双向剪力之间的耦合效应采用圆形屈服面描述,而双向剪力和扭矩之间的耦合效应采用锥体屈服面描述。De la Llera 和 Chopra^[67] 利用基于理想弹塑性模型的底部剪力—扭矩等效屈服面,分析了平面不规则结构的非弹性扭转效应。De Stefano 和 Pintucchi^[59] 提出考虑轴力和双向抗侧力之间耦合效应的恢复力模型,进而讨论了双向抗侧力耦合效应对平面不规则结构非弹性扭转效应的影响。Lin 和 Tsai^[54] 基于模态 Pushover 分析法,采用三自由度模态杆模型分析了双向水平地震激励作用下平面不规则结构的地震动力反应。Koliopoulos 和 Chandler^[71] 采用等效线性化法,分析了双向水平地震激励作用下平面不规则结构非弹性地震动力反应的概率统计特征,但分析中只考虑了双向水平位移的耦合效应,而忽略了平扭耦联效应的影响。

综上所述,由于平面不规则结构的影响因素众多且非弹性扭转反应分析困难,

现有的研究结论通常只适用于特定的计算模型和控制参数取值。与平面不规则结构的线弹性地震动力反应分析相比,目前有关非弹性地震动力反应的一致性结论还比较匮乏^[53,58,59,64]。鉴于此,文献[74]综合考虑强度退化、刚度退化、捏拢效应等典型滞回特性的影响,建立了双向水平地震激励作用下平面不对称结构非弹性地震动力反应分析的平扭耦联 BWBN 模型。该模型采用圆形屈服面来描述双向抗侧恢复力之间的耦合效应,采用锥体或球体屈服面来描述双向抗侧和抗扭恢复力之间的耦合效应。同时,结合 69 条强震记录,定量分析了平扭耦联效应对平面不对称结构地震延性需求的概率统计特征的影响。本书将在第 4 章介绍相关内容。

1.4 结构非弹性地震动力反应分析模型的参数识别

结构非弹性地震动力反应分析的 BWBN 模型虽然能够灵活地描述强度退化、刚度退化和捏拢效应等典型滞回特性,但 BWBN 模型本质上属于经验型滞回模型,其模型参数虽然具有明确的物理意义,但是缺乏定量的计算公式^[75]。因此,如何根据结构或构件的拟静力往复加载试验数据,高效、准确地识别 BWBN 模型的参数取值,是开展结构非弹性地震动力反应分析的基础。

目前,模型参数识别的方法主要包括确定性方法和随机寻优方法两种。其中,梯度法(Gradient-based Method, GM)是一种比较典型的确定性方法,具有计算原理简单、应用方便等优点,但是收敛速度较慢,识别效率对初始值比较敏感,且迭代过程容易陷入局部最优,导致识别精度有限。随机寻优方法主要包括模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法、人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)算法、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法、微分进化(Differential Evolution, DE)算法等。其中,SA 算法^[76]来源于模拟固体内部粒子在升温过程中变为无序状、在冷却过程渐趋于有序状的物理现象。SA 算法适用于离散型、连续型及混合型变量,其鲁棒性、全局收敛性、隐含并行性等性能较优,适应性较广,但识别效率不高,且参数和试探数的控制上难以选取。ANN 算法^[77]主要模拟由大量简单的神经元按某种方式连接形成的智能仿生动态网络,以简单非线性神经元作为处理单元,通过广泛连接构成大规模分布式并行处理的非线性动力学系统。因此,ANN 算法具有较好的自适应能力及非线性映射能力,且容错性较好,但容易陷入局部最优解。GA 算法^[28,29]是一种模拟遗传选择和自然淘汰生物进化过程的仿生计算方法,具有适应性较广、平行性良好、全局优化性能较强等优点,但需要进行选择、交叉、变异等操作,计算量较大,而且采用二进制编码难以应用于实数问题。PSO 算法^[78]来源于对鸟群觅食行为的研究,主要模拟鸟群在飞行过程中经常会突然改变方向、散开、聚集,其行为不可预测,但其整体总保持一致,个体与个体之间总保持最适宜的距离的自然现象。PSO

算法无需 GA 算法的选择、交叉、变异等操作, 编码也比较简单, 但对于高度非线性系统的识别精度有限。DE 算法^[79] 是一种基于群体进化的高效随机搜索全局优化算法, 可以对非线性不可连续空间函数进行最小化, 具有记忆个体最优解和种群内信息共享、计算过程简单、收敛速度快、鲁棒性好和全局搜索能力强等优点, 而且直接采用实数进行操作, 可以避免 GA 算法采用二进制编码存在的缺陷。

近年来, 结构非弹性地震动力反应分析模型的参数识别得到了国内外学者的广泛关注。Sengupta 和 Li^[28,29] 基于 GA 算法, 对钢筋混凝土剪力墙和梁柱节点的 BWBN 模型参数进行了分析; Xu 和 Dolan^[24] 利用 GA 算法, 对轻型木框架钉节点的 BWBN 模型参数进行了识别; 薛晓敏等^[80] 结合 GA 算法和 BWBN 模型, 对磁流变阻尼器的滞回模型参数进行了识别; Ma 等^[26] 基于 DE 算法, 对“T”型木结构节点的 BWBN 模型参数进行了识别; 唐和生等^[78] 对比分析了 PSO 算法、GA 算法和 DE 算法在剪切型结构线弹性恢复力模型参数识别中的有效性, 发现 DE 算法比 PSO 算法和 GA 算法更为有效。

由于 DE 算法不需要采用二进制编码, 且具有算法原理简单、鲁棒性好、全局搜索能力强等优点, 所以本书将只介绍基于 DE 算法识别 BWBN 模型参数的基本原理和方法。同时, 考虑到单轴、双轴和平扭耦联 BWBN 模型的待识别参数分别有 12、24 和 36 个, 模型参数之间存在数量巨大的可能组合, 若根据试验数据识别所有的模型参数组合, 则计算量较大。因此, 本书将在参数识别前, 针对单轴、双轴和平扭耦联 BWBN 模型开展参数灵敏度分析, 将不显著的模型参数固定, 从而大大减少待识别模型参数的数量, 提高识别的效率。

综上所述, BWBN 模型和 DE 算法分别在非弹性体系的恢复力描述与模型参数识别中具有明显的优势。鉴于此, 本书第 5 章将首先介绍 BWBN 模型的局部敏感性和全局敏感性分析方法, 然后介绍 BWBN 模型参数识别的 DE 算法, 最后以单轴 BWBN 模型为例, 基于不同破坏模式和不同锈蚀程度的钢筋混凝土柱的拟静力往复加载试验数据, 对钢筋混凝土柱的单轴 BWBN 模型的参数灵敏度进行分析, 并利用 DE 算法识别出单轴 BWBN 模型的参数。相关理论和方法可进一步推广至双轴或平扭耦联 BWBN 模型中, 也可基于其他类型结构或构件的拟静力往复加载试验数据, 开展 BWBN 模型的参数识别。

1.5 内容框架

本书主要介绍工程结构非弹性地震动力反应分析的 BWBN 模型及其参数灵敏度分析与参数识别方面的基本理论和方法。本书的内容框架如下:

第 1 章首先介绍单向、双向和平扭耦联地震激励作用下, 工程结构非弹性地震动力反应分析模型的研究现状及关键问题, 然后介绍非弹性地震动力反应分析

模型在参数灵敏度分析和参数识别方面的研究现状及难点。

第 2 章主要介绍结构非弹性地震动力反应分析的单轴 BWBN 模型。主要内容包括: 单轴 BWBN 模型的运动控制方程及其归一化处理方法; 单轴 BWBN 模型的非弹性恢复力、数值一致性切线刚度和割线刚度的数值解法; 单轴 BWBN 模型运动控制方程的 Newmark-Beta 数值解法等。

第 3 章主要介绍结构非弹性地震动力反应分析的双轴 BWBN 模型。主要内容包括: 双轴 BWBN 模型的运动控制方程及其归一化处理方法; 双轴 BWBN 模型的非弹性恢复力与割线刚度的数值解法; 双轴 BWBN 模型运动控制方程的 Newmark-Beta 数值解法等。

第 4 章主要介绍结构非弹性地震动力反应分析的平扭耦联 BWBN 模型。主要内容包括: 平扭耦联 BWBN 模型的运动控制方程及其归一化处理方法; 平扭耦联 BWBN 模型的非弹性恢复力与割线刚度的数值解法; 平扭耦联 BWBN 模型运动控制方程的 Newmark-Beta 数值解法等。

第 5 章主要介绍 BWBN 模型的参数灵敏度分析与参数识别方法。主要内容包括: BWBN 模型局部灵敏度分析的单次单因子法 (One-factor-at-a-time method, OAT 法); BWBN 模型全局灵敏度分析的 Sobol 法; BWBN 模型参数识别的 DE 算法等。

附录主要介绍《结构非弹性地震动力反应分析与参数识别软件》的使用说明。该软件主要分为参数灵敏度分析模块、参数识别模块和非弹性地震动力反应分析模块, 适用于单轴、双轴和平扭耦联 BWBN 模型的参数敏感性分析、参数识别和非弹性地震动力反应分析。

参 考 文 献

- [1] Foliente G C. Hysteresis modeling of wood joints and structural systems. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 1995, 121(6): 1013-1022.
- [2] Bockstedte A, Paevere P, Ma F, et al. Parameter analysis of the differential model of hysteresis. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 2004, 71(3): 342-349.
- [3] 翟长海, 孙亚民, 谢礼立. 考虑 $P-\Delta$ 效应的等延性位移比谱. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(10): 1513-1517.
- [4] Gupta A, Krawinkler H. Dynamic $P-\Delta$ effects for flexible inelastic steel structures. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 2000, 126(1): 145-154.
- [5] Williamson E B. Evaluation of damage and $P-\Delta$ effects for system under earthquake excitation. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 2003, 129(8): 1036-1046.
- [6] Kalkan E, Graizer V. Coupled tilt and translational ground motion response spectra.

- Journal of Structural Engineering-ASCE, 2007, 133(5): 605-619.
- [7] 张海燕, 易伟建. 结构随机延性需求谱的应用研究. 工程力学, 2006, 23(6): 11-16.
- [8] Hong H P, Hong P. Assessment of ductility demand and reliability of bilinear single degree of freedom systems under earthquake loading. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(12): 1606-1615.
- [9] Goda K, Hong H P. Estimation of seismic loss for spatially distributed buildings. Earthquake Spectra, 2008, 24(4): 889-910.
- [10] Ismail M, Ikhouane F, Rodellar J. The hysteresis Bouc-Wen model, a survey. Archives of Computational Methods in Engineering, 2009, 16(2): 161-188.
- [11] Song W, Dyke S. Real-time dynamic model updating of a hysteretic structural system. Journal of Structural Engineering-ASCE, 2014, 140(3).
- [12] Ayoub A, Chenouda M. Response spectra of degrading structural systems. Engineering Structures, 2009, 31(7): 1393-1402.
- [13] 叶献国. 基于非线性分析的钢筋混凝土结构地震反应与破损的数值模拟. 土木工程学报, 1998, 31(4): 3-13.
- [14] 赵忠虎, 谢和平, 许博等. 钢筋混凝土压弯构件恢复力特性研究状况. 工业建筑, 2006, 36(1): 62-65.
- [15] Bouc R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis.//Proceedings of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillation, 1967, Prague, Czechoslovakia.
- [16] Bouc R. Modèle mathématique d'hystérésis: application aux systèmes à un degré de liberté. Acustica (in French), 1971, 24: 16-25.
- [17] Wen Y K. Method for random vibration of hysteretic systems. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1976, 102(2): 249-263.
- [18] Baber T T, Wen Y K. Random vibrations of hysteretic degrading systems. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1981, 107(6): 1069-1089.
- [19] Baber T T, Noori M N. Random vibration of degrading pinching systems. Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 1985, 111(8): 1010-1026.
- [20] Rodrigues H, Romão X, Andrade-Campos A, et al. Simplified hysteretic model for the representation of the biaxial bending response of RC columns. Engineering Structures, 2012, 44: 146-158.
- [21] Kottari A K, Charalampakis A E, Koumousis V K. A consistent degrading Bouc-Wen model. Engineering Structures, 2014, 60: 235-240.
- [22] Xu J, Dolan J D. Development of a wood-frame shear wall model in ABAQUS. Journal of Structural Engineering-ASCE, 2009, 135(8): 977-984.
- [23] Zhang H C, Foliente G C, Yang Y M, et al. Parameter identification of inelastic structures under dynamic loads. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(5): 1113-1130.