

砌体结构 抗震鉴定评估方法及应用

QITI JIEGOU

KANGZHEN JIANDING PINGGU FANGFA JI YINGYONG

苏启旺 著



西南交通大学出版社

砌体结构

抗震鉴定评估方法及应用

苏启旺 著

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

砌体结构抗震鉴定评估方法及应用 / 苏启旺著. —
成都: 西南交通大学出版社, 2016.7
ISBN 978-7-5643-4778-9

I. ①砌… II. ①苏… III. ①建筑 - 砌体结构 - 抗震
结构 - 评估方法 IV. ①TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 154648 号

砌体结构抗震鉴定评估方法及应用

苏启旺 著

责任编辑	姜锡伟
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都勤德印务有限公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	13
字 数	232 千
版 次	2016 年 7 月第 1 版
印 次	2016 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-4778-9
定 价	48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

砌体结构具有保温隔热性能好、易于取材和造价低廉等优点，在我国有着悠久的历史。目前，在我国广大农村及中小城市，砌体结构仍然是一种被广泛应用的结构形式。我国属地震频发国，为保障地震作用下人民生命和财产安全，准确评估既有砌体结构抗震能力以及地震作用下的破坏程度，十分必要。

根据抗震鉴定评估指标进行评估是对既有建筑结构进行抗震鉴定时最简单方便的方法，其中确定抗震鉴定评估指标需求值是关键。我国现有建筑抗震鉴定标准对砌体结构进行抗震鉴定时，其抗震鉴定指标需求值的确定主要是依据抗震设计规范，而日本国家抗震鉴定指标需求值的确定主要是依据实际地震震害。汶川地震后，大量的砖砌体结构房屋受到严重破坏或倒塌，为依据实际地震震害得到抗震鉴定评估指标需求值提供了素材。

针对砌体结构，本书从结构承载力、变形能力等方面，建立了砌体结构抗震鉴定评估指标。基于汶川地震中大量多层砖砌体结构房屋震害数据的分析，我们得到了抗震鉴定评估指标的需求值，从而实现对砖砌体结构抗震能力的评估，结果更符合实际，应用也简便。书中给出了一些应用实例，供广大工程技术人员、科研人员和研究生参考。

限于时间及作者的水平，书中不妥之处在所难免，衷心希望广大读者提出宝贵意见和建议。

作 者

2016 年 3 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 国内外建筑结构抗震性能评估方法及研究发展	2
1.3 砌体结构抗震分析及鉴定方法研究现状	12
第 2 章 中日两国抗震鉴定方法的比较研究	17
2.1 日本钢筋混凝土抗震鉴定方法	17
2.2 中国现行规范抗震鉴定方法	35
2.3 中日两国抗震鉴定方法的对比分析及启示	43
第 3 章 砌体结构震害调查与分析	45
3.1 汶川地震烈度分布情况	45
3.2 震害调查	47
3.3 砖砌体震害总结	49
第 4 章 基于承载力的结构抗震能力表征指标研究	54
4.1 砌体结构与混凝土结构实现抗震能力途径的差异	54
4.2 表征指标 I_w	60
4.3 表征指标 I_{sq}	76
第 5 章 考虑构造柱等影响的结构抗震能力表征指标研究	94
5.1 构造柱和圈梁等对砌体结构抗震性能的影响分析	94
5.2 考虑构造柱等因素影响的表征指标 ψ 的建立	97
5.3 影响系数与延性指标间关系的分析	108
5.4 表征指标 ψ 的分析	110
5.5 砌体结构在高烈度区应用的分析	113

第 6 章 表征指标评估与现行规范方法评估的比较研究	117
6.1 表征指标评估方法	117
6.2 遭遇烈度 9 度区工程	118
6.3 遭遇烈度 10 度区工程	131
6.4 遭遇烈度 8 度区工程	143
第 7 章 现行抗震鉴定标准中相关问题的研究和改进	154
7.1 历版抗震鉴定标准对抗震墙基准面积率的规定	154
7.2 不同版本抗震鉴定标准对抗震墙基准面积率取值的比较	156
7.3 抗震墙基准面积率的修正	158
7.4 改进前后的对比分析	161
第 8 章 现行抗震设计规范中相关问题的研究和改进	163
8.1 历版建筑抗震设计规范对层数、总高度限值及构造柱 设置的规定	163
8.2 历版抗震设计规范对层数限值和构造柱设置规定的差异	167
8.3 现行抗震设计规范中相关问题的改进	168
第 9 章 应 用	174
9.1 既有建筑物快速抗震鉴定评估	174
9.2 村镇建筑的简易鉴定与设计	181
参考文献	186

第 1 章 绪 论

砌体结构分为 3 类^[1-3]: 无筋砌体结构 (unreinforced masonry structure)、约束砌体结构 (confined masonry structure) 和配筋砌体结构 (reinforced masonry structure)。我国广泛应用的砌体结构主要是无筋砌体结构和约束砌体结构两大类, 本书主要针对这两类砌体结构展开研究。

1.1 问题的提出

地震是地壳快速释放能量的过程中造成振动、期间会产生地震波的一种自然现象, 它直接或间接地对社会和自然界造成破坏。直接破坏是指它会引起地面开裂、变形和建筑物的破坏或倒塌以及造成人畜伤亡和财产损失等; 间接破坏是指它会引起其他的次生灾害, 如海啸、火灾、泥石流、放射物质扩散等, 这些次生灾害均可以使人类生存的自然环境产生巨大变化, 对灾区的生态环境产生严重影响。

据统计, 世界上平均每年有 1 万人因地震而死亡^[4, 5]。联合国教科文组织调查结果显示, 1926—1950, 地震造成的经济损失高达 100 亿美元; 另外, 世界银行与国际减少灾害战略联合发布的报告指出, 1970—2008, 自然灾害总共在全球造成了 23 000 亿美元的财产损失, 其中因地震造成的损失所占比例最大。近年来在许多国家, 地震灾害造成损失的历史纪录不断被刷新, 表明城市抗御灾害的能力变得越来越脆弱^[5]。

我国地震区域广阔而分散, 地震频繁而强烈。在整个 20 世纪, 震级等于或大于 8 级的强地震已发生 10 次之多, 其中发生于人烟稠密之处者, 损失惨重。1556 年陕西的关中地震, 被害有名可查者 83 万余人; 1920 年宁夏的海原地震, 死亡 20 余万人, 伤者不计其数; 1976 年河北唐山 7.8 级地震, 死亡 24 万余人, 强震区内的房屋、工业厂房与设备、城市建设等都受到严重破坏。2008 年四川汶川 8.0 级大地震, 是新中国成立后我国所经历的破坏性最强的一次地震, 地震造成了大量建筑物倒塌和损坏, 导致了巨大的人员伤亡和财产

损失^[6-9]。因此,建筑结构的抗震安全成为各级政府和土木工程界普遍关心的问题。

砌体结构在我国有悠久的历史且被广泛应用,1990年,我国砖产量超过6 000亿块,为世界上其他国家砖产量的总和,其中90%应用到砌体结构墙体中。办公室、住宅等民用建筑中大多采用砌体结构,修建的层数在新中国成立后也不断增加,20世纪50年代砌体房屋一般为3~4层,现已有大量5~6层的砌体结构建筑,有些已建到7~8层;在工业建筑方面,中小型单层工业厂房和多层轻工业厂房以及大量的影剧院、食堂、仓库建筑曾在20世纪60—70年代广泛采用砌体结构,主要采用砌体墙和柱承重结构^[10-11]。砌体结构有许多优点:保温、隔热性能好,节能效果明显^[12-15];材料来源广泛,易于取材,造价低廉;有很好的耐久性和较好的耐火性,使用年限长;施工时不需要模板和特殊的施工技术设备,节省材料等。目前,在广大村镇及多数中小城市中,砌体结构仍然是最主要的建筑结构形式之一,评估其抗震性能显得尤为重要。我国现行抗震规范采用“三水准”抗震设防^[16-20],即“小震不坏,中震可修,大震不倒”。通过两个阶段设计来实现,即:第一阶段设计是强度计算,通过强度计算满足第一、二水准设防的要求;第二阶段设计是弹塑性变形验算,但对于砌体结构仅通过第一阶段的强度验算并加以构造措施来达到三水准目标的要求。另外,建筑结构在使用期限内遭遇的地震强度有很大的不确定性,往往在设防烈度较低的地区发生强烈地震,强烈地震及其地面运动具有很大的不确定性。因此,研究砌体结构能够抵抗多大的地震强度并评估其是否达到了“三水准”目标的要求变得十分重要。

汶川地震后,震区中大量砌体结构房屋出现了不同程度的破坏,大量砌体房屋严重破坏和倒塌,造成了严重的生命和财产损失^[21-43]。历史的震害经验及相关研究表明,减轻既有建筑物地震灾害的有效途径是对其进行合理的抗震评估且对不满足抗震要求的建筑物采取相应的加固措施。因此正确评估砌体结构的抗震性能以及预测在大地震作用下的破坏程度具有重要的理论研究和实用价值。

1.2 国内外建筑结构抗震性能评估方法及研究发展

1.2.1 国内建筑结构抗震性能评估方法及研究发展

到目前为止,我国对既有建筑物抗震评估的研究可以大致分为三个阶段。

第一阶段为起步阶段,时间大致从新中国成立后到 1976 年。该段时间内,我国多地发生了许多大地震,如 1966 年 6.8 级的邢台地震和 1975 年 7.5 级的辽宁海城地震等;与此同时,我国抗震规范在吸取苏联、美国等国家经验的基础上,于 1964 年编制了《地震区建筑设计规范(草案稿)》,1974 年出版了第一个抗震规范《工业与民用建筑抗震设计规范(试行)》(TJ11—74);对于建筑物抗震评估工作也在地震的震害调查中起步,当时的地震震害调查发现一部分房屋受损较轻,分析其原因是该类房屋均在地震前进行了简单的加固处理^[44-48]。在此以后,在北京和天津两地进行试点,开展对建筑物的抗震调查和鉴定工作,并于 1968 年编制了京津地区一般民用建筑、单层工业厂房、农村房屋、旧建筑及水塔、烟囱等构筑物的抗震鉴定标准(草案)和抗震措施要点。1970 年,在云南省通海 7.8 级地震的总结会上,正式提出要对现有未设防的房屋采取积极的防灾减灾措施,在地震发生之前把预防工作做好,这是我国建筑物抗震工作的大跨越。1975 年,辽宁海城 7.5 级地震发生后,根据当时北京和天津地区的防灾形势,北京和天津两市需对一些重要工程建筑物进行抗震鉴定并采取适当的加固措施。在此背景下,国家基本建设委员会负责制定了《京津地区工业与民用建筑抗震鉴定标准(试行)》,该标准于 1975 年 9 月正式实施。这部标准是我国第一个抗震鉴定标准,北京和天津部分房屋依据此标准进行了抗震评价及加固工作,我国迈出了建筑物抗震评估及加固的第一步。

第二阶段为发展阶段,时间大致从 1976 年 7.8 级唐山大地震到 1989 年,是我国抗震评估和加固的发展时期。这段时间内,我国发生了举世震惊的 7.8 级唐山大地震,它给我国带来了巨大损失^[46],同时也促进了我国抗震工作的开展。在吸取唐山地震经验的基础上,《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ11—78)正式出版,对于建筑物抗震评估的经验在此次地震中得到了证实,并大力推广。1976 年冬,原国家基本建设委员会抗震办公室正式成立,并主持召开了第一次全国抗震工作会议,布置了全国抗震加固工作,其中包括全国抗震重点城市、厂矿企业、电力、铁路、水利、通信等国家重点抗震加固项目,并组织广大科技工作者进行了震害调查和抗震加固技术的试验研究工作。1977 年 12 月,《工业与民用建筑抗震鉴定标准》(TJ23—77)颁布,与此同时,《工业建筑抗震加固图集》(GC01)和《民用建筑抗震加固图集》(GC02)两套图集也与该标准配套使用,成为指导全国建筑抗震鉴定与加固工作的规范文件,这标志着我国建筑物抗震加固已从京津局部地区的试点推广至全国。从此,我国抗震鉴定工作逐步进入规范化的轨道。

第三阶段是全面发展阶段,时间大致从 1989 年颁布的《建筑抗震设计规

范》(GBJ 11—89)至今。这段时间内,我国经历了汶川 8.0 级大地震的考验,抗震设计规范经历了 2001 年、2008 年、2010 年三次修订,设防烈度为 6 度地区的建筑物被纳入抗震评估中,强调了建筑结构抗震能力的综合分析,在《工业与民用建筑抗震鉴定标准》(TJ 23—77)的基础上进行了局部修订,《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—95)于 1995 年颁布实施。在《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—95)的基础上进行局部修订,《建筑抗震鉴定标准》(GB 50023—2009)于 2009 年 7 月实施,此次修订主要体现在以下几个方面:(1)扩大了鉴定标准的适用范围,提出了现有建筑鉴定加固的后续使用年限,给出了相应不同设防目标的鉴定方法;(2)明确了现有建筑抗震鉴定的设防目标,与新修订《建筑工程抗震设防分类标准》(GB 50223)有了较好的衔接;(3)同时根据汶川大地震建筑震害的经验教训,加强了楼梯间、框架填充墙、易倒塌伤人部位的鉴定要求^[49, 50]。

1.2.2 建筑结构抗震性能评估方法的分类

目前,评估既有建筑物抗震性能的方法主要分三大类^[51, 52],分别为经验评估法、规范验证法和理论分析法。

经验评估法主要以地震震害为基础,在此基础上进行统计分析和总结而成。按照分析过程的不同,它又可以分为几大类,如经验总结法、直接统计分析法、当量统计法、专家主观评估法、城镇地区群体震害预测的快速法等。经验评估法的基本思路为:从建筑结构抗震设防目标出发,对实际建筑的结构布置、构件形式、屋盖支撑、构件连接及围护墙连接构件等进行现场调查,并与震害案例进行对比来判断建筑物的抗震能力;必要时可对建筑物的抗震承载力进行验算来综合评定。经验评估法调查建筑结构信息有原设计图纸、原施工资料、现有使用情况等,并根据调查情况进行分析给出建议。根据调查的粗细程度又可分为初步调查和详细调查,初步调查即宏观检查,包括了解建筑物外观、功能用途、构件和节点等信息;详细调查则包括了解建筑物是否存在缺陷,缺陷的大小、位置、严重程度及发展状况,构件的断面尺寸、材料强度,等。

规范验证法是指根据现场实际测得的材料强度、构件断面尺寸及自振周期,利用现行抗震设计规范提供的抗震验算方法,评价建筑物的抗震性能。其计算步骤与抗震设计步骤基本相同,多遇地震作下的内力和变形分析可假定结构与构件处于弹性工作状态,内力和变形分析可采用线性静力方法或线性动力方法,罕遇地震作用下结构抗震薄弱部位的检验可采用非线性分析方法,包括静力非线性分析和动力非线性分析。

理论分析法包括能量法、静力弹塑性分析、逐步增量时程分析等。

能量法最早出现在 20 世纪 50 年代,由 Housner 提出^[53, 54],其思路十分简单,认为结构在地震中的反应是一个耗散地震输入能量的过程。结构耗散的形式主要有阻尼耗能和塑性滞回耗能两种。其中后者导致损伤,就是要地震输入能量小于结构耗能能力,以此来评估结构在罕遇地震下的抗震能力,更确切的表达为结构构件所分配到的地震输入能量小于或等于结构构件的耗能能力^[55],其研究内容也可大致分为耗能需求和耗能能力两类^[56, 57]。耗能需求的研究以计算分析为基础,主要包括结构地震能量输入谱、结构累积滞回耗能量计算、弹塑性 MDOF 系统累积滞回耗能分布等问题的研究;而耗能能力的研究主要以实验为基础,通过实验数据分析统计,确定结构和构件累积滞回耗能与其损伤之间的关系,建立含累积滞回耗能指标的损伤模型,用于对结构或构件进行耗能能力的设计。

静力弹塑性分析(Pushover 分析)是指借助结构推覆分析结果来确定结构弹塑性抗震性能或结构弹塑性地震响应的一种分析方法。这种方法在国外研究和应用较早,最早源于 1975 年 Freeman 等提出的能力谱法^[58]。从本质上说 Pushover 分析是一种静力非线性计算方法,它将结构静力弹塑性分析与结构反应谱结合,用于结构抗震性能的评估。1981 年, Mehdi Saiidi^[59]通过逐级增加水平荷载,从而得到了结构水平方向的力-变形曲线,将多自由度体系转化为等效的单自由度体系进行非线性地震反应分析,该等效单自由度体系也称为 Q 模型,这一简化对 Pushover 方法的应用起了重要作用;1987 年, Peter Fajfar 进行了改进^[60, 61],提出了 N2 法,其字母的含义为: N 代表非线性分析, 2 代表两种不同的分析方法,即反应谱方法和推覆分析方法, N2 法也是静力弹塑性分析方法的一种。Hulmut Krawinkler 和 Seneviratna 等^[62]对 Pushover 分析方法作了全面的阐述,讨论了该方法的优点、适用范围、目标位移及侧向荷载分布,并指出了其局限性,同时对该方法作了全面的总结,并对其理论价值和应用价值作了较高评价。日本在新《建筑基准法》^[63]中也采用了基于性能设计概念的能力谱法;美国国家标准技术研究所、ATC-40 和联邦应急委员会的 FEMA273, FEMA274 等文件中也引入了静力弹塑性分析方法用于既有建筑的抗震性能评估^[64]。在我国,叶燎原和潘文介绍了该方法的计算原理和实施步骤,结合算例给予了说明,并对分析中的若干问题提出了建议^[65];魏巍、冯启民^[66]对能力谱法、位移影响系数和反应谱静力弹塑性分析进行了对比,讨论了其存在的问题并给出了改进建议;缪志伟、马千里、叶列

平等^[67]对一幢框架结构和一幢框架剪力墙结构进行 Pushover 分析,并以逐步增量弹塑性时程方法 (IDA) 的分析为基准,对 Pushover 方法的准确性和适用性进行了研究,结果表明,Pushover 方法仅适用于以第一振型为主的低矮结构,对于高层结构,由于高阶振型影响较大,Pushover 分析结果与结构实际弹塑性地震响应差异较大;侯爽、欧进萍^[68]对不同层数的钢筋混凝土框架结构采用 5 种不同的侧向力分布进行 Pushover 分析,将分析结果与非线性时程分析结果进行对比,量化了高阶振型对不同结构反应的影响,并对高阶振型影响下 Pushover 分析中侧向力分布的选取提出了建议;李刚、刘永等^[69]等采用美国 FEMA 273 建议的均布加载、倒三角加载和多振型加载模式对两个存在刚度偏心和质量偏心的结构进行了 Pushover 分析,将分析结果与非线性动力时程分析结果进行了比较,比较结果表明 Pushover 分析可以反映三维偏心结构的抗震性能,建议选取倒三角加载或多振型加载模式中一种并与均布加载组成加载模式;方德平、王全凤^[70]提出了改进能力谱,基于钢筋混凝土构件截面的 $M-N-\phi$ 关系,考虑 $P-\Delta$ 效应和剪切变形的非线性刚度矩阵,放弃了塑性铰假设,对结构的延性系数进行了定义,将结构极限状态的坐标点确定为性能点,以此来评估结构抗震能力,最后以一框架结构为例说明了该方法的应用;同时,大量中外学者如 Chopra A K、Kilar V、叶献国、杨溥、钱稼茹等也对该方法作了较深入的研究,为静力弹塑性分析的工程化应用奠定了基础^[71-80]。

逐步增量时程分析,简称 IDA 方法,对于一条特定的地震动输入,通过设定一系列单调递增的地震强度指标,并对每一个地震强度指标下的地震输入进行结构弹塑性时程分析,得到一系列的结构弹塑性地震响应。该方法提出较早^[81],但由于分析需依赖大量弹塑性时程分析计算,对计算能力有很高的要求,直到近年来随着计算机的发展才开始大量使用。它基于动力弹塑性时程分析,能够反映结构在同一地震不同强度下的抗震性能,可以对结构抗震能力作出全面和真实的评估。相比 Pushover 方法,IDA 方法模拟的是结构在地震下的动力响应过程,因而克服了 Pushover 方法将动力过程简化为静力过程而带来的问题,一般情况下,只要有足够多的地震输入,且结构建模合理准确,IDA 分析是全面模拟结构抗震性能的手段。马千里、叶列平等以框架结构、框架剪力墙结构为例,对 IDA 方法和各种侧向力模式的静力弹塑性分析以及 MPA 方法进行了对比研究,分析了静力弹塑性分析的不足并提出了改进建议^[82, 83]。但该方法计算量大,目前主要应用于钢筋混凝土结构,对于砌体结构来说,其合理建模是难点。

1.2.3 国外建筑结构抗震性能评估方法及研究发展

1. 美国基于性能的结构抗震评估研究现状

目前,世界各国传统抗震设计理论大多采用多级设计方法,如我国以“小震不坏,中震可修,大震不倒”作为设防水准,以此为基础制定建筑抗震设计规范。按规范设防水准设计的结构在遇到中等强度或大震时,允许出现一定程度的破坏,但主体结构不能倒塌,确保生命安全。这种抗震设计理念没有考虑保证中、小地震时房屋结构,特别是非结构构件的不破坏,也没有考虑地震破坏造成的经济损失和社会影响,这种设计理念的实质是以生命安全为单一设防目标的抗震设计理念。

但是近年来一些震害的结果表明,这种抗震设计理念在地震中虽然基本保证了生命安全,却不能在大震甚至中小地震中有效地控制建筑结构地震破坏所造成的直接和间接经济损失,而这些破坏和损失往往超出了设计者的预料。表 1.1 给出了具有代表性的震害统计数据。

表 1.1 具有代表性的震害统计数据

地震	震级	人员伤亡、建筑物破坏	经济损失
1989 年美国加州 Loma Pirta 地震	M7.1	63 人死亡,摧毁了 2.7 万余幢建筑	直接经济损失 80 亿美元,总损失 100 亿美元
1994 年美国 Northridge 地震	M6.7	伤亡数百人,11 000 多间房屋倒塌	300 亿美元
1995 年日本阪神大地震	M7.2	死亡 6 434 多人,24 万 9 000 多幢房屋倒塌和损坏	经济损失高达 1 000 亿美元
1999 年土耳其地震	M7.4	直接死亡 1.4 万人,倒塌房屋 10 万余间	直接经济损失超过 200 亿美元
1999 年中国台湾地震	M7.6	2 000 多人死亡,总死伤人数超过 1 万人,倒塌建筑物 9 909 栋,严重破坏 7 575 栋	财产损失 92 亿美元
2008 年中国汶川地震	M8.0	共遇难 69 227 人,受伤 374 643 人,失踪 17 923 人	直接经济损失达 8 451 亿元

这些震害说明了随着经济发展、社会化程度的不断提高和人口密度的增加,潜在的地震损失呈上升趋势,甚至中等强度地震造成的损失就可能超出社会和业主所能承受的程度。综上所述,随着现代工业社会的发展,科学技术的日新月异,城市的功能越来越趋向于集成化、智能化和密集化,因此地震造成

的损失也就越来越大^[5]。另外,随着私有房屋面积的扩大,房屋业主们对其房屋在地震中可能遭遇的破坏和功能失效程度十分关心,往往希望能明确估计花多少钱可以买到什么样抗震性能的房屋,这种按单一基于生命安全性能水准进行抗震设计的建筑,已越来越不能满足社会发展和人类的需要。

1995 年 SEAOC 发表的 Vision2000 报告首次对性能化抗震设计的一系列关键概念进行了系统描述^[84]。

在此之后,在美国加州安全委员会资助下,由应用技术委员会(ATC)提出《混凝土建筑的抗震鉴定与加固》,通常称为 ATC40^[62],该书所推荐的评估方法主要针对混凝土结构,但其思路对于大多数其他类建筑也具有参考价值。该书对关于建筑物评估和加固的主要步骤如下:

- (1) 确定需要评估的建筑物。
- (2) 选择具有结构抗震分析、设计和加固经验的工程技术人员,同时也要求熟悉非线性分析方法。
- (3) 从对应特定地震危险水准的性能目标选项中选定一个性能目标。每个性能目标包含两部分:建筑整体性能水准和地震危险水准,性能目标可以分解为结构性能水准(SP- n ,其中 n 是指定的数字)和非结构性能水准(NP- n ,其中 n 是指定的字母)。结构性能水准和非结构性能水准单独确定,但是二者的组合决定了建筑整体性能水准。结构性能水准有即时使用(SP-1)、破坏控制(SP-2)、生命安全(SP-3)、生命安全(SP-4)、结构稳定(SP-5)、不考虑(SP-6);非结构性能水准有正常运行(NP-A)、即时使用(NP-B)、生命安全(NP-C)、减少危险(NP-D)、不考虑(NP-E)。
- (4) 建筑物现状评定:现场调查和对照施工图。
- (5) 进行非线性分析,确定建筑性能点。
- (6) 确定是否需要加固,如需加固,则要求细化加固设计并递交规划审查。
- (7) 施工质量监督。

另外在 FEMA 资助下,“美国建筑地震安全委员会(BSSC)”“美国土木工程学会(ASCE)”和“国家减轻地震灾害计划(NEHRP)”提出了《建筑抗震加固技术指南》及相关建议书,即 FEMA273, FEMA274^[85, 86],它主要以现有建筑结构基于性能的抗震加固为目的而写,但所提出的方法同样适用于新建筑的设计。该书中所阐述的方法与 ATC40 相类似,业主确定建筑物所要达到的性能目标,然后工程师提出加固或新结构设计所要达到的性能目标,基本的性能水准的定义与 ATC40 的定义相似;与 ATC40 不同的是,该书中所提的建议适用于所有材料,同时对结构线性与非线性分析给出了一些限制条件。

总体上,ATC40 的基于性能设计的基础与 FEMA273 和 FEMA274 的“建

筑抗震加固改造指南”以及 1995 年 SEAOC 的 Vision 2000 “建筑基于性能的地震工程”一样。基于性能的地震工程主要的优点是：工程师和业主一起选择性能目标，而业主决定建筑物可以接受的破坏程度。工程师可以帮助业主更好地了解建筑物可能出现的破坏程度，尽管不会减小由于地震运动、建筑材料特性以及构件性能或几何形状的不确定所带来的风险，但是，它可以提供一种新的方法解决某些参数取值过于保守的问题，发现其他方面的缺陷。ATC40 和 FEMA273/274 设计指南为基于性能的地震工程提供了一套可实施的方法，这对基于性能设计的建筑规范的实施迈出了重要的一步。

后来，Yun 等^[87]提出了“需求和能力系数法（Demand and Capacity Factor Method）”，被美国的评估规范 SAC2000a, b 采纳，该方法考虑钢框架抗震需求和能力的不确定性，并能给出满足不同性能水准下以概率大小表示的可靠等级。显然，这是基于性能抗震评估方法的发展趋势。基于性能抗震评估方法的核心问题是不同性能水准下结构地震需求和能力的合理确定，Vamvatsikos, Cornell 提出的逐步增量时程分析法^[88]为解决这一问题提供了思路。

2. 日本建筑结构抗震能力评估研究

1920 年 12 月 1 日，日本《都市建筑法》施行，规定了 6 个主要都市的建筑技术规则，该法律采用容许应力法进行设计；1924 年，在关东大地震后，又引入了地震系数对都市建筑法进行了修改；1950 年 11 月 23 日，《都市建筑法》废止，《建筑基准法》（称“旧抗震设计法”）同步实施，随后经多次修改，《建筑基准法施行令改正》于 1981 年 6 月 1 日颁布实行，代替《建筑基准法》（称“新抗震设计法”）。

1995 年日本兵库县发生地震后，日本吸取经验教训，即工程师与公众之间缺少沟通，当时日本的建筑设计准则是在遭遇最大地震作用时，允许结构产生破坏，但不应倒塌，而公众则希望了解所使用建筑物在地震作用下可能发生的破坏程度^[89]。日本阪神大地震发生后，于 1995 年 4 月建设省开展了一项为期 3 年的研究项目，成立了由国内著名学者参加的新建筑构造体系综合委员会，并建立“新构造体系促进会议”来协调开展各方面工作。该项目的目标是为建立基于性能的结构工程方法，以此来推动技术的创新与发展。一旦该方法得以建立，就搭起了一座公众与建筑工程师们之间沟通的桥梁，业主能够充分了解结构安全、破坏和使用性能。因此，该项目对基于性能的建筑结构设计理论本身及其工程实用价值展开了广泛而深入的研究，主要开展以下几个方面的工作^[90-92]：

(1) 开展对不同性能水准的定义, 结构性能水准主要有三级: 建筑结构的性能水准有适用性、破坏控制、安全性等 3 个水准的要求, 其中安全性水准是建筑物保护业主的最低要求, 而破坏控制水准则是在大地震作用下控制财产损失在可接受的范围, 该水准由业主自行选取。

(2) 对三级抗震设防水准展开研究, 三级抗震设防水准为建筑寿命期结构的最高抗震设防水准、遭遇少数较强地震概率的设防水准和可能遭受多次地震概率的设防水准。

(3) 对 3 种结构计算方法展开研究, 3 种计算方法为弹塑性解析法、弹性解析法、等效线性化反应谱解析法。

(4) 定义结构和构件的动力反应特性参数, 主要包括等效刚度系数、极限变形、阻尼系数、构件恢复力特性、位移反应谱、加速度反应谱、滞回耗能和弹性应变能力等。

(5) 对结构安全性的指标展开研究, 如采用极限变形等指标作为评价结构安全性的标准。

根据这一方法, 建筑业主可以在给定的外界作用下, 对建筑项目提出不同的性能水准, 结构工程师则向业主提供相应的技术服务, 包括投资造价以及遭受地震后的修复费用等。1998 年, 应日本政府的要求, 基于性能设计对建筑基准法进行了修改, 1999 年 8 月, 建筑基准法强制性执行的相关技术条款进入最后修订阶段, 因为建筑基准法是维护社会福利的最低要求, 建设省建筑研究所提出了一个对建筑基准法的建议框架, 以补充现行规范的有关规定。该建议框架的主要内容如下^[89]:

(1) 该建议中规定了评估既有建筑物结构性能的方法, 规定了结构满足各种作用的性能目标。

(2) 对不同性能目标的设计荷载作了规定。

(3) 对检验性能水准的原则作出了要求, 如在地震作用、风雪荷载等最大出现概率水准下, 结构的反应不应超过承载力和位移限值, 并且将 Pushover 方法引入地震作用下的结构验算。

2000 年, 日本公布性能设计方法, 称为 Calculation of Response and Limit Strength, 简称 CRLS, 所采用的分析方法也是推覆分析方法, 即用能力谱法检验建筑物的抗震性能。在地震水平方面, 它考虑 50 年及 500 年回归期地震; 在性能水平方面分为损坏开始和生命安全两种状态。(1) 损坏开始为构件内力达到其容许应力或者任何楼层的层间变位角达到 $1/200$, 此状态下所用的

结构周期采用弹性周期。(2) 生命安全为建筑结构任何楼层无法抵抗其所设计的垂直载重, 如构件达到极限变形能力, 构件极限变形能力除本身的挠曲及剪力之外, 还需考虑相连构件所引起的变形。CRLS 与美国 ATC40 均是 ADRS 格式的能力谱法, 基本原理和计算步骤也相同, 即将推覆分析方法所得的结构能力曲线与弹性反应谱转为 ADRS 格式绘于同一张图, 再利用非线性系统迟滞消能原理, 将其转换为等效黏滞性阻尼简谐运动下耗散的能量, 依此将反应谱折减来确定性能点^[93]。

日本抗震能力评估方法由 Hajime 等提出^[94-96], 并不断地发展和完善^[97]。1999 年土耳其 Kocaeli 和中国台湾 Chi-chi 地震后, 该方法也被墨西哥、印度尼西亚、秘鲁、土耳其、罗马尼亚等地震多发国采用^[98]。它认为建筑结构的抗震能力由结构抗震能力指标和结构抗震能力需求指标组成, 根据地震震害调查统计获得结构抗震能力需求指标。

根据结构抗震能力指标和结构抗震能力需求指标, 日本建筑防灾协会 (JBDPA) 提出了既有多层钢筋混凝土建筑结构的三阶段抗震评估体系, 任何阶段的评估都可用来确认结构是否满足抗震安全要求。

3. 欧洲建筑结构抗震能力评估研究

欧洲国际混凝土协会 (CEB-fib) 在既有钢筋混凝土结构抗震评价方面也开展了很多的研究, 1998 年出版了《控制非弹性反应的钢筋混凝土结构抗震设计 (设计原理)》一书, 提出基于位移的方法来评价既有钢筋混凝土结构的抗震性能, 并进行抗震加固设计^[99]。它也提出了三种不同的极限状态, 分别为直接可用极限状态、可修复极限状态和最最终极限状态。针对直接可用极限状态、可修复极限状态提出了诸如裂缝宽度、混凝土应变等微观的控制指标, 以此作为设防目标, 对既有框架结构在遭受不同水准地震作用下的抗震性能进行评价。

欧洲建筑结构所采用的标准为欧洲规范 ECS 的相应部分 (EC8/1-4), 它对结构抗震评价未做重点阐述, 而着重于结构的修复和补强两个方面, 对于既有建筑的抗震评估主要采用规范中对于新建框架结构的抗震设计分析方法。EC8 规范考虑了两种极限状态, 一种是“最最终极限状态”, 即相应于倒塌或危及人身安全或其他形式的结构失效; 另一种是“正常使用极限状态”, 即相应于一个已经发生了损伤的状态, 在超越该状态后, 不能再满足规定的使用要求。以两种极限状态对既有钢筋混凝土结构进行抗震评估, 考察其在某一水准地震作用下结构所处的状态^[100]。