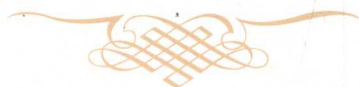




基于能量平衡的 建筑结构抗震设计

*Earthquake-Resistant Design Method for Buildings
Based on Energy Balance*



[日] 秋山宏 著

叶列平 裴星洙 译 潘 鹏 校

清华大学出版社

基于能量平衡的 建筑结构抗震设计

*Earthquake Resistant Design Method for Buildings
Based on Energy Balance*

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

能量平衡原理能够全面揭示建筑结构抗震的机理,反映建筑结构抗震的本质。基于能量平衡的建筑结构抗震设计是理论上非常完备的设计方法。日本东京大学著名教授秋山宏 40 多年来对基于能量平衡的抗震设计进行深入系统的研究,建立了完整的计算理论和设计方法,在国际上具有重要影响。目前日本已将基于能量平衡的抗震设计方法作为与基于承载力和基于延性抗震设计方法并用的方法,并体现在日本《建筑基准法》中。本书是秋山宏教授的专著《建筑结构抗震极限状态设计》的简明版,避免了深奥的理论,通俗易懂,适合于从事建筑结构抗震设计方法的研究人员和工程抗震设计人员学习和参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于能量平衡的建筑结构抗震设计/(日)秋山宏著;叶列平,裴星洙译.

--北京:清华大学出版社,2010.12

(国外土木工程名著·翻译系列)

ISBN 978-7-302-24301-4

I. ①基… II. ①秋… ②叶… ③裴… III. ①建筑结构—抗震设计

IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 234610 号

责任编辑:徐晓飞 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:143×210 印 张:7.25 字 数:234 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版 印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:33.00 元

产品编号:007994-01

关于基于能量平衡的抗震设计方法,作者已出版如下专著:

- 《建筑结构抗震极限状态设计》,东京大学出版社,1980年第1版;1987年第2版。
- 《Earthquake-Resistant Limit State Design for Buildings》,东京大学出版社,1985年。

日本1981年对《建筑基准法》^①进行了修正,在原来“震度法”^②的基础上,增加了必须确保结构能量吸收能力的要求。在此背景下,为促进和发展新的结构抗震设计方法,出版了上述书籍。

目前,《建筑基准法》正向性能设计发展。结构抗震性能设计的目的是在设定的地震动作用下,确保建筑结构满足设定的容许损伤状态,并确保满足所设定的条件。因此,为实现性能设计,需要对建筑物在地震动作用下从破坏直至倒塌整个过程中的塑性状态具有全面而深入的洞察力。上述专著出版后,作者一直努力用基于能量平衡的方法来阐述建筑结构在地震动作用下的非线性响应。正如弹性力学中存在线性关系一样,作者确信

① 日本的《建筑基准法》涉及与建筑相关的所有问题的法规,其中也包括建筑结构的抗震安全。1981年6月,日本对《建筑基准法》进行了修订,其中的“抗震标准”部分进行了大幅度修改,在原“容许应力计算”(一次设计)设计法的基础上,增加了“二次设计”法。一次设计是指,在水准1地震作用下,建筑结构的损伤程度很轻,经小规模修补后能继续维持其使用功能,即允许发生裂缝,但钢筋不屈服,采用允许应力设计法计算结构的承载力,最大层间位移角限值为1/200。二次设计法是指,在水准2地震作用下,建筑结构的损伤程度较重,经大规模修复后可再使用,最大层间位移角限值为1/100,且结构构件的塑性变形能力能保证结构的变形能力不小于设计极限变形,且在设计极限变形条件下,进行结构极限抗震承载力验算。水准1地震的地面速度为0.25m/s(相应地面加速度为(0.10~0.12)g),30年内超越概率50%的地震,重现期为43年;水准2地震的地面速度为0.5m/s(相应地面加速度为(0.3~0.4)g),50年内超越概率10%的地震,重现期475年。——译者注

② 震度法:震度法是1916年佐野利器提出的。震度是指结构地震响应加速度与地震地面运动加速度的比值 k 。 k 值乘以结构重量即得到结构的水平地震作用。1924年《市街地建筑物法》(日文)中取 $k=0.1$,1950年《建筑基准法以及实行令》(日文)中取 $k=0.2$ 。——译者注

通过能量平衡的方法来认识结构的塑性响应是有效的。

这次《建筑基准法》有关抗震设计的修订^①,与1981年的修订是一脉相承的,使得承载能力极限状态设计方法能够得到更普遍的推广。基于这种情况,出版本书的目的在于实质性地促进性能设计方法的发展。与上述专著相比,本书在本质上没有变化,只是为了使内容更容易理解而进行了整理,重点加强了结构抗震设计基本原理的介绍,删去了一些繁杂的细节。

在本书的编写过程中,东电设计(株式会社)的高桥诚博士对本书中的有关数值分析提供了很多帮助,技报堂出版社的石井洋平对本书的出版给予了支持,在此一并表示感谢。

作 者

1999年10月1日

① 1995年阪神大地震后,日本根据性能设计的要求,进行为期三年的“基于性能要求建筑设计新框架”研究。1998年6月,建筑设计方法由过去的“基于规范设计”修正为“基于性能设计”,并于2000年6月开始实施“改正建筑基准法”,其中包括如下四种设计方法:许用应力设计方法,极限承载力设计方法,特殊设计方法(基于能量平衡的设计法属于此种设计方法),以及时程分析方法。——译者注

2008年5月12日中国四川汶川发生的大地震造成了重大灾难。作为1993年创立的日中建筑结构技术交流会的会员,我也到汶川大地震灾区进行了考察。日中建筑结构技术交流会每两年举办一次,至今已经召开8次会议。每次会议上,与会代表对涉及结构技术的方方面面的内容开展互相交流,其中抗震设计一直是核心内容。这期间先后发生了日本兵库县南部地震(1995)、台湾集集地震(1999)、四川汶川大地震(2008)。2008年7月,在交流会中国代表崔鸿超先生的提议下,在成都临时召开了第7次日中建筑结构技术交流会第三次会议。会议期间两国代表去都江堰进行了震害调查,并就地震破坏情况进行了交流。在此背景下,我的著作《基于能量平衡的建筑结构抗震设计》(技报堂出版社,1990)由清华大学叶列平教授,江苏科技大学裴星洙教授翻译和负责出版中文版。本书已有韩国语和西班牙语译本。在大地震多发的中国,本书能否起到积极的作用,对本人来讲,意义深远,在此向两位教授表示衷心的感谢。

基于能量平衡的建筑结构抗震设计方法是去年去世的著名的 George Housner 博士首先提出来的。本人对该设计方法进行了40多年的研究。虽然该设计方法的研究尚远未完成,但我确信,这是能够综合把握建筑结构地震响应的最本质的方法。

衷心希望本书能够在汶川大地震灾害恢复重建和完善抗震设计方法中起到作用,并为促进日中间抗震理论和技术的交流作出贡献。

东京大学名誉教授

秋山宏

2009年10月17日

中国是世界上地震多发的国家之一,同时也是地震灾害最严重的国家。20 世纪,全球大陆 35% 的 7.0 级以上的地震发生在我国;全球死于地震的人数 120 万,其中我国有 59 万人。发生两次超过 20 万人死亡的特大地震也都在我国,即 1920 年的宁夏海原地震和 1976 年的河北唐山地震,死亡人数分别超过 23 万和 24 万。2008 年四川汶川 8.0 级大地震,再次造成重大灾害和人员伤亡。众所周知,房屋建筑的破坏和倒塌是造成地震灾害的最主要的原因,因此避免和减轻建筑物的震害是我国工程结构抗震设计和研究人员最重要的任务。

现代建筑结构抗震理论和设计方法始于 20 世纪初,迄今已取得很大发展,从 20 世纪初的静力法、反应谱法、能力设计法等,直到近年来的性能设计法。但译者认为,真正能够揭示建筑结构抗震机理的是能量原理。1956 年著名的 George Housner 博士提出了基于能量平衡的建筑结构抗震设计理论。由于该方法是从结构抗震机理上来建立设计方法,能够最全面地反映结构抗震的本质,因此也是理论上最完备的设计方法。尽管目前基于能量的结构抗震原理已得到普遍接受,但由于能量指标与传统的结构强度指标和延性指标有较大的差别,建立相应的计算理论和设计方法,难度依然很大。东京大学名誉教授秋山宏先生对基于能量的建筑抗震设计方法进行了 40 多年的研究,建立了系统完整的设计理论和方法,1980 年出版了专著《建筑结构抗震极限状态设计》(日文版第 1 版),1985 年出版了英文版专著《Earthquake-Resistant Limit State Design for Buildings》。由于秋山宏教授的长期、系统、全面的研究所取得的突出性研究成果,日本《建筑基准法》已将基于能量平衡的抗震设计方法作为与其他抗震设计方法并用的方法,日本建筑中心也出版了《基于能量平衡的抗震设计方法技术标准》。

1997 年,本书译者之一的叶列平在东京大学作为客座研究员期间,仔细学习了秋山宏教授的专著,获益匪浅,并在此后也开展了基于能量的建筑抗震设计方法研究。2000 年,得知秋山宏教授在 1980 年版专著的基础

上,出版了简明版《基于能量平衡的建筑结构抗震设计》(日文版),就有将此书翻译为中文的想法,并得到秋山宏教授的同意。但是,由于研究和教学任务繁重,加之当时中国在这方面的研究者较少,故一直未能实现。随着性能化结构抗震设计研究的发展,近年来对基于能量结构抗震设计方法研究的人员越来越多,工程设计人员也逐渐掌握结构抗震的能量原理。但目前我国还没有关于“能量法”方面的专著,因此我们深感有必要尽快将秋山宏教授的《基于能量平衡的建筑结构抗震设计》一书介绍给我国结构抗震研究人员和工程技术人员,以期推进我国在这方面的相关研究和应用。2009年6月在南京的学术会议上,有幸遇到熟知日语的江苏科技大学的裴星洙教授,在他的大力协助下,终于完成了10年前的计划。此外,秋山宏教授还专门为中文版补充了“第11章 针对地震动不可预知性的建筑结构抗震设计”,针对可能遭遇如汶川地震这样的特大地震情况,介绍了结构抗震设计及能量方法的最新研究成果。在本书的翻译过程中,还得到日本东京科技大学的北村春幸教授的热情协助,潘鹏副教授对本书译文也进行了仔细的校对,博士生施炜也协助做了大量工作,在此深表感谢!

希望本书中文版的出版能够对我国从事抗震结构的研究人员和工程抗震技术人员学习和理解结构抗震原理有所启发和帮助,并能够促进我国基于能量抗震设计方法的研究和应用。

叶列平

2010年1月于清华园

绪论	1
第 1 章 单自由度体系的输入能量	9
1.1 力平衡方程和能量平衡方程	9
1.2 输入能量的基本特性	12
1.2.1 无阻尼弹性体系的输入能量	12
1.2.2 有阻尼弹性体系的输入能量	13
1.2.3 弹塑性体系的输入能量	14
1.2.4 能量谱的形状	15
1.2.5 有效周期的概念	19
1.2.6 有效周期的算例	19
注: 地面运动输入的能量	24
第 2 章 多自由度体系的输入能量	26
2.1 连续体的弹性响应	26
2.1.1 振型分析	26
2.1.2 剪切杆的算例	29
2.2 剪切型多层结构的弹塑性响应	34
第 3 章 结构的损伤	39
3.1 损伤的表达	39
3.2 剪切型理想弹塑性体系的基本损伤分布	41
3.3 最优屈服剪力系数分布	42
3.4 多层结构层间损伤分布规则	44
3.4.1 基本损伤分布规则	44
3.4.2 损伤集中指数 n	45

3.4.3	损伤分布算例	47
3.5	层间损伤分布规则	51
第4章	累积塑性变形和最大塑性变形	55
4.1	最大变形的意义	55
4.2	累积塑性变形与最大变形的对应关系	56
4.3	$\eta\mu_m$ 关系的量化	58
4.3.1	分析参数	58
4.3.2	理想弹塑性恢复力模型的算例	60
4.3.3	考虑包辛格效应的理想弹塑性型恢复力 模型的算例	63
4.3.4	具有刚度退化型恢复力模型的算例	64
4.3.5	等价往复滞回次数	66
4.4	残余变形	67
4.5	等价线性化模型的成立条件	68
第5章	阻尼耗能	69
5.1	阻尼的概念	69
5.2	阻尼耗能	69
5.3	设计用 V_D 谱	72
5.4	阻尼耗能的统一评价	75
5.4.1	由滞回阻尼类推黏滞阻尼	75
5.4.2	滞回阻尼与黏滞阻尼的耦合	76
第6章	基于能量平衡抗震设计方法的基本框架	80
6.1	抗震结构	80
6.2	基本公式	82
6.3	基本参数的确定	84
6.3.1	满足 $\alpha_i/\alpha_1 = \bar{\alpha}_i$ 的 c_i, s_i, κ_1	84
6.3.2	p_i 的设定	86
6.3.3	针对 D_η 变化的处理	88
6.4	${}_1D_\eta$ 值	93

6.5 变形需求	95
6.5.1 基于 η_1 的表达	95
6.5.2 变形量的直接表达	95
6.6 多层结构的有效周期	97
第7章 隔震结构	99
7.1 隔震结构的发展史	99
7.2 隔震结构能够实现的原因	101
7.3 隔震结构的基本公式	105
7.4 上部结构为弹性时的隔震结构	110
7.5 隔震结构的优越性和今后展望	110
第8章 刚柔混合结构	112
8.1 刚柔混合结构概述	112
8.2 刚柔混合结构的基本公式	113
8.3 刚柔混合结构的可能性	118
第9章 有关抗震设计的补充	124
9.1 多层结构各层的特性	124
9.1.1 多层结构的层分解	124
9.1.2 层框架的分解与合并	126
9.1.3 合并框架单元的耗能能力	129
9.2 一般体系等效为理想弹塑性体系	131
9.2.1 一般恢复力特性	131
9.2.2 一般损伤分布准则	132
9.2.3 一般体系等效为理想弹塑性体系	136
9.3 p - δ 效应	137
9.3.1 p - δ 效应的大小	137
9.3.2 p - δ 效应对恢复力特性的影响	138
9.3.3 p - δ 效应对结构能量吸收能力的影响	139
9.3.4 抗震设计中的 p - δ 效应	140
9.4 抗震性能评估公式	142

9.4.1	抗震单元并列(同时发挥作用)的情况	142
9.4.2	抗震单元串联(先后发挥作用)的情况	144
9.4.3	构件的 D_s 值	145
9.4.4	梁屈服型结构的 D_s 值	147
9.5	弯曲变形的影响	149
9.5.1	基本周期	149
9.5.2	弯剪型结构的总输入能量	149
9.5.3	弯剪型结构的最优屈服剪力系数分布	150
9.6	扭转响应	151
9.6.1	含扭转变形的结构	151
9.6.2	总输入能量	152
9.6.3	损伤预测	153
9.6.4	可忽略不计扭转影响的条件	154
9.6.5	一般体系的损伤预测	155
9.6.6	多层结构的损伤集中	156
9.7	各种场地的能量谱	157
9.7.1	基于一维波动理论的分析结果	157
9.7.2	兵库县南部地震的能量谱	159
第 10 章	设计例题	164
10.1	概述	164
10.2	设计用能量谱	164
10.3	设计用公式及主要参数	166
10.3.1	钢筋混凝土剪力墙结构	166
10.3.2	强柱弱梁型框架结构	169
10.3.3	刚柔混合结构	172
10.4	数值算例	173
10.5	框架-剪力墙结构	182
第 11 章	针对地震动不可预知性的建筑物抗震设计	184
11.1	地震动的不可预知性	184
11.2	多层框架结构的抗震性能评价公式(忽略 $p-\delta$ 效应)	184

11.3	多层框架结构的抗震性能评价公式(考虑 p - δ 效应)	188
11.4	有效周期	190
11.5	例题	190
11.6	小结	194
11.7	补充: 刚柔混合结构的抗震设计	195
11.7.1	刚柔混合结构的抗震性能评估公式	195
11.7.2	例题	197
11.7.3	刚柔混合结构应采用的输入能量	198
11.7.4	小结	199
结束语		201
附录 恢复力模型		206
参考文献		214

1. 抗震结构的发展与刚柔之争

1923 年关东大地震^①之后,抗震设计作为抗震技术而诞生(见图 1)。此后,经过 75 年的时间,抗震设计取得了显著进展。随着适用对象的不断扩大,抗震设计理念也越来越多样化。伴随电子计算机的发展,地震响应分析技术得到快速进展,设计方法也向多样化和精细化方向发展。另一方面,由于接二连三的大地震的袭击,使人们逐渐认识到所采用的抗震设计方法的不完善。

结构抗震设计的最初出发点是在仅考虑重力作用而设计的结构骨架基础上,附加地震作用的抵抗力方法。随着历次震害教训和地震响应预测技术的进步,提高了人们对结构设计中应加强抗震设计重要性的认识,目前日本的结构设计实际上已经由抗震设计控制。

在这个过程当中,人们一直在探索能够从根本上避免地震所带来的严重危害的方法,并一直在追求实现隔震结构。但由于处在大约经历了半世纪时间才建立起来的抗震设计理论的阴影之中,隔震结构的实现不得不等到生根发芽时机的到来。隔震结构是在其设计理论发展成熟,且于 20 世纪 70 年代出现具有足够可靠性的多层橡胶支座后才确立的。

抗震结构的发展和隔震结构的确立,其发展道路是坎坷不平的,绝不是一帆风顺的。那是因为抗震设计不仅仅是简单的理论实践,而且具有保证公民安全的义务,并从一开始就具有法律效应。一方面抗震设计必须是由科学依据支撑的合理的设计方法,另一方面,作为法律,必须具有众人认可的简单易懂、明快的逻辑性。事实乃至科学与逻辑是不同等的。将错误

^① 关东大地震:1923 年 9 月 1 日中午时分,日本关东地区南部发生 7.9 级大地震,震灾波及 1 府 8 县,东京和横浜市的许多建筑物都成了一片瓦砾。正值中午烧饭时间,地震使炉灶翻倒,引起了东京市内大火,1/2 市区被焚毁。地震还引发了海啸。总计有 70 万住家毁坏或严重受损,死亡人数达到 13 万,灾民百余万,损失达 55 亿日元。日本自关东大地震后开始了现代防震减灾研究。——译者注

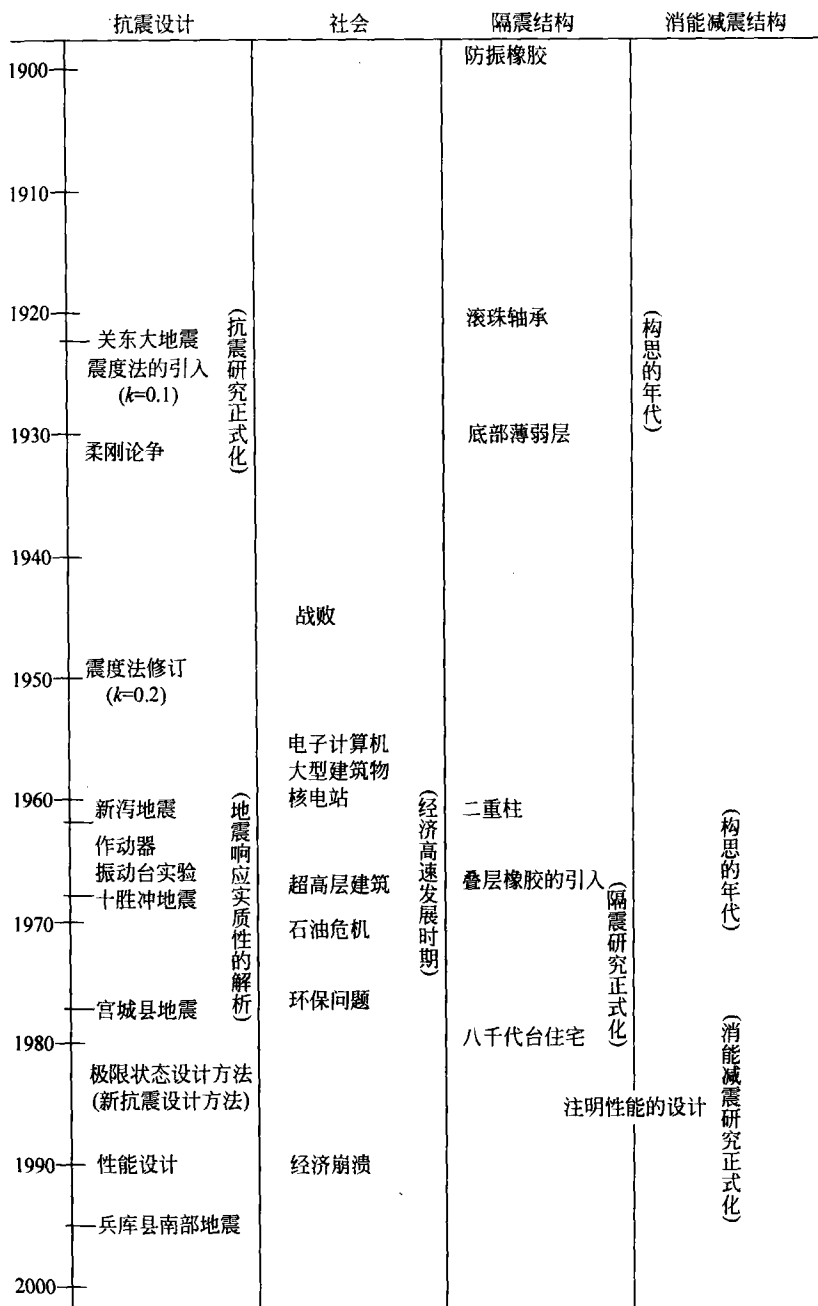


图1 历史背景

的事实讲得符合于逻辑性的社会现象,在生活当中经常出现。抗震设计深层次中所存在着的上述基本矛盾,就是长期争论的“震源”。

这场争论被称为“刚柔论争”,是在关东大地震后引入的震度法针对所推荐刚性结构而引发的学术论争^[1]。倘若考虑实现的可能性和逻辑性,震度法是一种非常好的设计方法,但是它的科学依据不充分。震度法的设计体系,经过 19 世纪 60 年代原子能发电站和高度经济发展时期后基本完成。这些建筑物的重要性要求高,必须以“刚性结构”作为设计目标。19 世纪 60 年代后半叶开始,经济高速发展,促进了都市高层建筑的发展,由此围绕在日本这个多地震国家建造高层建筑合理性的问题,展开了第二次刚柔论争。结果认识到震度与建筑结构周期成反比的事实,即结构周期越长,地震作用就越小。如此,极力主张“柔性结构”的一方高唱凯歌。

随着电子计算机的发展和地震观测记录的充实,当时可以计算得到较详细的建筑结构地震响应。因此,考虑强度和变形两个方面,很容易进行处于低层和高层之间的中低层结构的设计。新泻地震(1963)、十胜冲地震(1968)和宫城县冲地震(1973)充分暴露了基于震度法设计的不完善性的现实。采取何种方法提高建筑结构吸收能量的能力?围绕这个问题展开了第三次刚柔论争。

1981 年对《建筑基准法》进行了修订,在原来震度法的基础上,增加了必须确保结构吸收能量的能力,并作为建筑结构必须具备的条件。由此,依据震度法所需满足的基本强度和依据吸收能量所需满足的变形能力均需得到保证,形成了抗震设计的基本框架。然而,确保变形能力是超越弹性变形范围进入弹塑性变形状态之后的问题。因此,即使在分析技术相当发达的今天,要确保建筑结构的变形能力,也不是件容易的事情;反而在分析技术备齐的情况下,因选项增多,会面临难以获取证明其妥当性的困境。

在抗震设计中如何反映建筑结构变形进入弹塑性阶段后吸收能量的能力,是一个必须要解决的很重要的现实问题。这正是第三次刚柔论争的主题。针对抗震设计越来越复杂化的发展趋势,能够从根本上避免地震灾害的隔震结构在日本的适用性和可行性,也在这个时期进行了深入的讨论。传统的抗震结构,其抗震能力取决于结构的承载能力和塑性变形能力。因此,当遭到地震袭击时,结构肯定会受到不同程度的损伤。与此相

反,隔震结构则竭力主张遭到地震袭击后建筑结构主体不会受到任何损伤,向传统抗震结构提出了挑战^[2]。针对这一挑战,抗震设计界认为,日本是强地震国家,因为没有得到足够的认证,很难保证隔震结构的适用性和可行性。如此一来,隔震结构就难以被接受。另一方面,在抗震设计界的抵制下,隔震结构界根据抗震结构设计的论据,证明了隔震结构的适用性和可行性。在此过程中,叠层橡胶支座的出现是不可或缺的。叠层橡胶支座是一种优异的部件。下面对隔震结构的原理进行说明。

隔震结构是将房屋部分作为上部结构,隔震层和基础作为下部结构的一种二重结构。隔震层由具有柔软水平弹簧作用的叠层橡胶支座和能够全部吸收地震能量的阻尼器组成。与隔震层的侧移刚度相比,上部结构的侧移刚度很大,所以上部结构可以简化为质点,因此隔震结构成为一个单质点振动体系。

叠层橡胶支座具有很大的竖向承载力和水平弹性变形能力,这使得隔震结构自振周期可能超过 4 秒,而成为长周期结构。此外,由叠层橡胶支座的弹性特性和阻尼器的塑性特性组成的隔震层,可起到高效的能量吸收功能。

换句话说,隔震结构具有抗震结构的简单明了的特征,又具有长周期结构的优点,而且又毫无疑问的能确保能量吸收能力。隔震结构以其与传统抗震结构对立的概念而登上舞台。经过第四次刚柔论争以后,隔震结构在抗震结构界作为性能优良的结构而得到肯定^[2]。另一方面,作为传统的抗震结构,想要利用承受重力荷载的建筑结构骨架,来同时确保所需的强度和能量吸收能力则显然不合理。因此,传统的抗震结构很难具备简单明了的特征。

正值此时,1995 年 1 月 17 日早晨的兵库县南部地震,明确告诉我们日本的抗震结构应达到的目标值。震中区域的地震动强度远远大于《建筑基准法》中所规定的设防烈度。通过大量建筑震害分析,人们意识到要实现完美的抗震设计还需要经历漫长的路程。在这次地震中,离震源不远的地方有两栋隔震结构,则以事实证明了能够发挥其预期的性能。

20 世纪的抗震研究领域,以隔震结构的出现和发展为主题而落下帷幕。但是,很难想象今后的建筑结构全部采用隔震结构。在意识到隔震结构的优越性后,必定将有所突破。随着工程实例的不断增加,隔震结构在质量上也将得到升华,趋于完美。无论如何,第五次刚柔论争必定将围绕