

结构抗震 实验方法

邱法维 钱稼茹 陈志鹏 著



科学出版社

结构抗震实验方法

邱法维 钱稼茹 陈志鹏 著



科学出版社

2000

内 容 简 介

本书主要论述了结构抗震实验方法的理论及其应用。全书共分六章,内容包括结构抗震实验方法的发展过程、结构抗震实验的方法、结构抗震实验中广泛应用的拟静力加载实验方法、地震模拟振动台实验方法、拟动力实验的基本方法和在不同方面的应用,以及抗震实验存在的问题和今后的展望。

本书可供结构工程专业的科研人员和工程技术人员,以及研究生和大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构抗震实验方法/邱法维等著. -北京:科学出版社,
2000

ISBN 7-03-007874-8

I. 结… II. 邱… III. 结构设计-抗震试验 IV. TB302.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 42226 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京双青印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2000年1月第一次印刷 印张:10 1/4

印数:1—3 000 字数:230 000

定价:15.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

本书主要总结了结构抗震实验方法的理论及其应用，主要包括四个部分：

第一部分（第二章）是结构的拟静力加载实验方法。这种方法由于加载实验设备投资小、使用方便，是目前结构抗震实验中使用最多的方法。文中详细介绍了一维、二维的拟静力实验加载规则和控制方法，着重强调了近年来计算机控制技术在拟静力加载实验方法中的应用及其发展，同时给出了许多应用实例。

第二部分（第三章）是地震模拟振动台实验方法。从地震模拟振动台的设计、建造到控制系统的原理与控制方法都作了较详细的论述，通过具体结构的抗震实验应用实例，介绍了结构模型设计制造、实验准备、数据采集和分析处理的地震模拟振动台实验全过程。

第三部分（第四章）是拟动力实验方法。这种方法吸取了数值计算方法与拟静力实验方法的优点，可以进行大型结构的地震实验研究。这一部分首先介绍了拟动力实验的基本思想、常用的数值积分算法和设备装置情况，接着讨论了多维拟动力实验方法、子结构拟动力实验方法、采用无条件稳定数值积分方法的拟动力实验方法，同时给出了这些方法的应用实例，最后讨论了拟动力实验的误差问题及其控制方法。

第四部分（第五章）讨论了拟动力实验方法的应用。首先讨论了子结构拟动力实验在结构-设备相互作用、节点抗震性能研究以及复杂结构构件方面的应用；然后介绍了如何将拟动力实验方法用于解决多维多点地震输入下的结构响应问题；土-结构相互作用、土层地震反应分析也是抗震研究中的重要议题，拟动力实验方法在这方面的研究也可以发挥重要的作用。这一部分的最后讨论了快速（实时）拟动力实验方法的原理与应用问题。由于传统拟动力实验方法往往只是适用于加载速率不敏感结构，而现代结构尤其是采用隔震和耗能等措施的结构都具有很强的加载速率敏感性，所以快速（实时）拟动力实验方法特别适用于这类结构的地震响应模拟。

最后对结构抗震实验方法的现状、存在的问题进行了总结，讨论了结构抗震实验方法的发展趋势。

本书作者一直从事结构抗震实验方法的研究和应用工作，故书中大部分内容是作者多年来科研工作的总结，但同时参考和引用了国内外许多学者的研究成果，特在此对他们表示诚挚的谢意。由于将结构抗震实验方法的基本原理与实际应用密切结合，所以本书的内容和成果不仅适用于从事抗震实验研究的科研人员，对于从事理论研究和抗震设计的人员也会有有一定的启发和帮助，一些理论分析和结构工程设计中难以把握的具体问题，通过本书的实验的方法一般都可以获得可靠的结果。由于结构抗震实验方法的内容十分广泛，发展也很快，加之作者个人的知识能力所限，书中定会存在一些缺点和欠妥之处，敬请各位专家、学者予以批评指正。

邱法维

1999年7月于清华园

SEISMIC TEST METHODOLOGY FOR STRUCTURES

ABSTRACT

In this book, the theories and applications of structural seismic test method are summarized, including four parts as follows.

The first part concerns with the quasi-static test method, which is widely used in research of structural seismic behavior for its low cost and convenience. The loading law and control procedure in one dimensional test and in bi-dimensional test are discussed in details, especially the computer control loading method during with many examples is given.

The second part is the shaking table test method. Designs of shaking table, construction of control system and control method are described. Construction of structural model, test preparation, data acquisition and analysis for the shaking table test procedure are introduced.

The third part deals with the pseudodynamic test method, which has advantages of both numerical analysis and quasi-static test. In this part, the pseudodynamic test principal, general numerical integration and necessary equipment are introduced. Then, the substructure pseudodynamic test techniques and unconditional stable algorithm are described. Meanwhile, the reliability of pseudodynamic test method is verified by the test results. Finally, the strategy of how to reduce the test errors is discussed.

The fourth part shows the applications of pseudodynamic test method in study of structural seismic response. In recent years, pseudodynamic test technology has achieved new developments in some special fields, such as structure-equipment interaction, multidimensional and multiple earthquake excitations, soil-structure interaction, and soil layer earthquake response. The fast pseudodynamic test and the real-time pseudodynamic test are being put into practice.

Conclusion and further research topics are in the last chapter.

The structural seismic test methods (quasi-static test, shaking table test and pseudodynamic test) are introduced by means of theoretical and experimental results in this book. It is shown that test method is a very efficient approach to study structural seismic response. Although the test method needs to be improved in some way, it is still the most important and the most efficient approach to study the seismic response of complex structures nowadays.

Any suggestions and comments are welcomed.

Qiu Fawei

July, 1999

• v •

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 抗震实验方法概述	(1)
1.2 结构抗震实验的方法	(4)
参考文献	(6)
第二章 结构的拟静力加载实验方法	(9)
2.1 引言	(9)
2.2 加载设备和装置	(9)
2.3 一维拟静力加载实验	(14)
2.4 恢复力模型、损伤模型及其参数确定的实验应用实例	(17)
2.5 多质点结构体系的拟静力加载实验方法	(23)
2.6 二维拟静力结构加载实验方法	(26)
2.7 二维加载实验应用实例	(30)
参考文献	(40)
第三章 地震模拟振动台实验方法	(41)
3.1 引言	(41)
3.2 地震模拟振动台的发展概况	(41)
3.3 地震模拟振动台的设计和建造	(47)
3.4 控制系统与控制方法	(50)
3.5 地震模拟振动台的实际应用	(56)
参考文献	(68)
第四章 拟动力实验方法	(70)
4.1 引言	(70)
4.2 拟动力实验的基本方法	(75)
4.3 数值积分方法的稳定性和精度(显式方法)	(78)
4.4 等效单自由度体系的拟动力实验	(81)
4.5 子结构拟动力实验方法与技术	(82)
4.6 子结构拟动力实验方法应用(一)	(89)
4.7 多维拟动力实验方法	(99)
4.8 无条件稳定的数值积分方法(隐式方法)	(104)
4.9 拟动力实验的误差及其控制方法	(108)
4.10 拟动力实验软件的开发	(110)
参考文献	(115)

第五章 拟动力实验方法专题	(119)
5.1 引言	(119)
5.2 子结构拟动力实验方法应用 (二)	(119)
5.3 结构在多维多点地震输入下的拟动力实验方法	(127)
5.4 土-结构相互作用问题	(136)
5.5 土层地震反应分析	(139)
5.6 快速 (实时) 拟动力实验	(141)
参考文献	(147)
第六章 存在的问题与展望	(151)
6.1 拟静力实验的加载规则问题	(151)
6.2 实验方法与抗震设计之间的关系	(152)
6.3 拟动力实验方法的拓展问题	(152)
6.4 关于实验研究人员和实验室问题	(153)
参考文献	(153)

CONTENTS

Chapter 1	Generals	(1)
1.1	Development of Seismic Test Method	(1)
1.2	Methods and Contents of Seismic Test	(4)
	References	(6)
Charter 2	Quasi-Static Test Method	(9)
2.1	Foreword	(9)
2.2	Loading Equipments and Facilities	(9)
2.3	One-Dimensional Quasi-Static Test	(14)
2.4	Application of Determining of Hysteretic and Damage Model	(17)
2.5	Quasi-Static Test Method for MDOF Structure	(23)
2.6	Two-Dimensional Quasi-Static Test Method	(26)
2.7	Applications of Two-Dimensional Quasi-Static Test Method	(30)
	References	(40)
Charter 3	Shaking Table Test Method	(41)
3.1	Foreword	(41)
3.2	Review of Shaking Table Test Method	(41)
3.3	Design and Construction of Shaking Table	(47)
3.4	Control System and Scheme for Shaking Table	(50)
3.5	Applications of Shaking Table Test Method	(56)
	References	(68)
Charter 4	Pseudodynamic Test Method	(70)
4.1	Foreword	(70)
4.2	Principle of Pseudodynamic Test Method	(75)
4.3	Stability and Accuracy of Numerical Integration (Explicit)	(78)
4.4	Pseudodynamic Test for Equivalent SDOF Structure	(81)
4.5	Pseudodynamic Test Method with Substructure Technique	(82)
4.6	Applications of Pseudodynamic Test Method with Substructure Technique (1)	(89)
4.7	Multi-Dimensional Pseudodynamic Test Method	(99)
4.8	Unconditional Stable Numerical Integration (Implicit)	(104)
4.9	Test Error and Control Algorithm for Pseudodynamic Test	(108)
4.10	Developing of Pseudodynamic Software	(110)
	References	(115)
Charter 5	Special Topic for Pseudodynamic Test	(119)
5.1	Foreword	(119)
5.2	Application of Pseudodynamic Test Method with Substructure Technique (2)	(119)
5.3	Pseudodynamic Test Method under Multi-Dimensional and Multi-Point Excitation	(127)
5.4	Pseudodynamic Test Method for Soil-Structure Interaction	(136)

5.5	Pseudodynamic Test Method for Soil Layer Seismic Response	(139)
5.6	Fast (Real Time) Pseudodynamic Test Method	(141)
	References	(147)
Charter 6	Problems and Prospect	(151)
6.1	Loading Code of Quasi-Static Test Method	(151)
6.2	Relationship between Test Method and Earthquake-Resistant Design	(152)
6.3	Extend of Pseudodynamic Test Method	(152)
6.4	Testing Researchers and Laboratory	(153)
	References	(153)

第一章 概 论

1.1 抗震实验方法概述

结构工程是一门实践性很强的学科,是在实践经验的基础上发展建立的。人们首先在实践中积累和掌握了结构工程的经验,在此基础上,通过不断地学习、不断地应用,逐步形成了理论。与人类居住的历史相比,结构工程理论的形成要晚得多,而结构抗震理论的形成和发展就更晚了,是在本世纪初才开始的。20 年代日本采用在建筑物上加一水平力代表地震对结构的作用力可能算是最早的结构抗震设计方法了。

在人类历史上,由于地震造成的灾害是极其严重的,人类在地震灾害中付出了极大的代价,也取得了宝贵的经验。对于地震灾害,预防措施应当是最主要的方法,虽然临时性的地震预报可以大大减少人员的伤亡,但是根本性的预防措施在于采取合理的结构抗震设计方法,提高房屋的抗震能力,避免结构的倒塌和严重损坏。由于结构抗震设计方法的发展是与社会经济的发展和科学技术的进步密切相关的,所以人类真正开始比较系统地研究结构的抗震设计方法并将其以法规的形式确定下来还是本世纪初的事情。随着理论研究的深入和实际应用的发展,到目前结构抗震理论已经形成了一个内容很庞大的科学领域。而结构抗震的实验研究作为结构抗震理论的重要组成部分,是与结构抗震理论的发展密切相关的,因此结构抗震理论的发展过程也代表了结构抗震实验的发展过程。没有实验作基础,抗震理论难以得到验证和认可,就更难以应用于实际工程;而抗震理论方面没有突破和进展,也很难对抗震实验方法提供指导,促进实验研究的发展。同时,其它科技领域的发展也是抗震实验方法发展的重要前提。如果按时间顺序划分,结构抗震设计理论的发展大致经历了静力理论、反应谱理论、直接动力分析理论和目前正在发展中的概率弹塑性理论这样四个阶段,在这四个阶段中抗震实验方法也经历了不同的发展阶段。

1.1.1 静力实验方法的开始

结构抗震的静力理论创立于 20 世纪 20~40 年代,是由日本的大森房吉教授首先提出的^[1,2],他也是第一个试图对结构在地震作用下提出完整计算理论的人。静力理论是假定结构为绝对的刚体,当受到地震作用时,它处于水平振动状态,因此在任何瞬间结构上各点的加速度都相等,惯性力在结构上的分布与质量分布成正比,结构所受到的地震力等于地震荷载乘上一个地震系数。由于静力理论忽视了实际结构的弹性性质及其有关的动力特性,虽然计算简单,但与实际情况不相符合。一个最简单的反例就是日本兴业银行的例子,该房屋受到比设计用的侧力相对应的加速度大 5 倍的地震加速度却仍然没有损坏。

拟静力加载实验方法就是在这时期开始的,然而当时并不是用于抗震实验研究,而是由于 1919 年第一个 Quebec 大桥的倒塌,为了研究铆钉连接的性能而进行的,当时使用的是螺旋型实验机^[3]。早期的这种实验大部分是单调加载方式,后来由于结构疲劳问题的增多,循环加载方式才开始使用。1906 年 San Francisco 和 1923 年 Kanto 的两次大地震

后,抗震实验研究才有了初步的发展。而这一时期抗震实验研究的主要工作还是集中在对整体结构动力特性方面^[4],包括开展强震观测和建立地震台网观测站等。这一时期,塑性设计方法的发展和框架分析的改进导致了足尺连接部位的实验,Young 和 Jackson 进行了循环加载下的连接件实验,实验采用了一种改进的螺旋型实验机,可以比较好地测量循环加载下连接件的 Moment-Rotation 特征^[5],如图 1-1 所示。该项实验揭示了连接件的强度和刚度的退化特征,同时也成为现代结构抗震实验研究的中心议题之一。

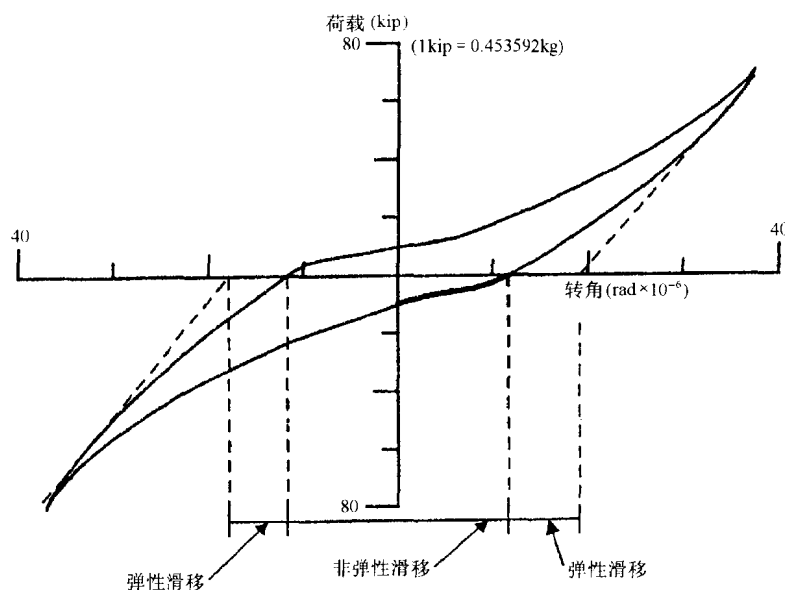


图 1-1 Moment-Rotation 曲线

1.1.2 动力测试及现场实测阶段

40 年代开始出现了反应谱理论^[6~9],它是将地震波作用于单质点体系时,取位移、速度和加速度反应的最大值与单质点振动体系的周期之间的关系。反应谱理论考虑了结构的弹性性质,利用结构动力学的振型分解方法,将结构转化成单质点体系的叠加,每一单质点体系代表一个振型。反应谱曲线最初是由 M. Biot 提出的,后来 G. W. Housner 采用了 EL-Centro 地震波、Olimpia 地震波和 Taft 地震波,给出了平均地震反应谱的概念,使这一方法得以实现。反应谱理论由于采用了大量强震观测数据,并且能够正确而简单地反映地震动的特性,因此在国际上得到了广泛的应用,大大推动了结构抗震设计理论的发展。

反应谱理论虽然考虑了结构的动力特性,但在结构设计中,仍然是将地震力作为静力来对待,所以它只能称为准动力理论。在制作反应谱的过程中只考虑了地震动的振幅和频谱两种因素,没有考虑地震持时对结构破坏的影响,这是它的不足之处。另外,反应谱是以弹性理论为基础的,无法反映结构在强震作用下的非线性工作状态;虽然目前已经提出了弹塑性反应谱方法,但由于结构非线性问题的复杂性,距实际应用还存在差距。

由于结构动力特性与反应谱之间的密切关系,所以这一阶段的实验工作主要是结构的动力特性测试,以便准确地得到结构的频率、振型和阻尼。但是另一方面,地震后由于结

构的破坏造成结构的自振周期变长、阻尼变大,所以结构、构件的极限强度和变形能力等方面的实验开始受到重视。

1.1.3 地震模拟实验阶段(直接动力分析理论阶段)

随着强震观测水平的提高,取得了大量的地震动记录和结构地震反应的记录,这为直接将实际地震记录输入到结构中进行地震反应分析提供了先决条件。另一方面,这一方法的发展也得益于计算机技术和实验技术的发展,因为地震加速度不能用数学式子表达,所以结构的动力方程也就无法通过解析的方法求解,只能采用离散化的数值积分方法求解各个时刻的结构地震反应,计算工作量是非常大的,只有计算机才能完成这项工作。由于直接采用了实际地震记录输入进行结构地震反应分析,从而全面地考虑了强震三要素(振幅、频谱和持时)对结构破坏的影响;结构或构件的弹塑性性质采用了比较合理的全过程恢复力曲线模型,从而使计算结果能够详细、具体地给出结构弹塑性地震反应的全部过程,这对于了解构件在整个地震过程中的受力状态、判断结构的屈服机制、找出结构的薄弱环节都具有重要的意义。目前对一些特殊的、复杂的重要建筑越来越多地采用直接动力分析的方法,而且在十多个国家的规范中都作出了明确的规定。

这一时期抗震实验最重要的标志是大型地震模拟振动台的建立和拟动力实验方法的应用。60年代末首先在美国加州大学伯克利分校建成了一座 $6.1\text{m} \times 6.1\text{m}$ 的水平、垂直两向地震模拟振动台,同期日本国立防灾科学技术中心也建成了世界上最大的 $15\text{m} \times 15\text{m}$ 的地震模拟振动台^[10]。70年代初期,美国首先将拟静力实验方法用于获取构件的数学模型,为整体结构的计算机分析提供构件模型,同时通过地震模拟振动台实验对结构模型参数作了进一步的修正。

70年代初在日本开发应用的拟动力实验方法则是结构抗震实验研究过程中的一项重大成就^[11]。这个时期可以认为是抗震实验方法发展过程中的一个里程碑。从实验设备的发展来看,闭环控制的电液伺服实验系统提高了实验的控制载荷和位移的精度;新型的传感器如位移计和应变计以及光纤和激光设备的采用可以精确测量结构响应;数据的采集和分析处理系统能够准确可靠地使用几十或几百个传感器来记录结构的实验表现;大型反力墙和反力台座允许进行大型足尺构件甚至原型结构的实验。从试件类型和研究内容来看,试件从节点、构件到足尺结构模型都进行了较多数量的实验研究;学术交流和国际合作研究也变得活跃,大学与研究所之间以及国际间进行了合作,许多国家都积极地参与,政府也给予支持。

1.1.4 抗震实验的广泛应用阶段

80年代开始的结构抗震实验研究空前活跃,这其中以美、日两国合作进行的足尺七层钢筋混凝土结构的一系列实验研究最为著名,在第八届世界地震工程大会上专门为这一合作研究项目进行了系列总结。另外,新西兰、美国和日本以及后来中国参加的对钢筋混凝土框架进行的合作研究项目,都促进了结构抗震理论的发展,也大大提高了结构抗震实验方法和技术的水平。

这一时期,中国的抗震实验研究得到了很大的发展,主要原因是80年代初国家给予了很大的投入以及世界银行给予贷款,许多大学和科研机构的结构工程学科先后建成了

大型的结构实验室并购置了一批先进的实验设备,例如同济大学、国家地震局工程力学研究所和水利水电科学研究院抗震所建成了多维地震模拟振动台;国家建筑科学研究院结构所、哈尔滨建筑大学、重庆建筑大学、西安建筑科技大学和湖南大学等引进了大型电液伺服结构实验系统。这些抗震实验设备为我们国家的结构抗震研究作出了重要贡献。

从 80 年代到 90 年代的十几年时间里,结构抗震实验在概念、方法、技术和设备更新等诸多方面都发展很快,一方面是由于结构抗震研究的需要,另一方面是由于现代电子计算机技术的飞速发展,同时设备生产厂家对产品的不断开发和创新也是重要因素。当年美、日在进行足尺七层钢筋混凝土结构实验研究时,由于控制系统和加载设备的限制而不得不将七个自由度等效成单自由度体系;现在,我们可以很方便地用计算机控制一个多自由度结构的拟动力实验、拟静力实验或地震模拟振动台实验。另外,像拟静力实验中出现的杂交实验方法,拟动力实验中出现的子结构实验技术和实时拟动力实验方法,都为结构抗震研究提供了新的手段。

虽然结构抗震实验方法已经发展到了一个很高的水平,但是仍然面临着许多问题。目前的结构抗震理论已经发展到了概率弹塑性设计理论阶段^[12],这是由于地震发生具有时间、空间和强度方面的随机性所决定的,而且地震发生的本身也具有明显的随机性。因此,从概率理论的角度出发,采用随机动力分析的方法才能比较全面、深入地把握地震作用的规律。由于概率弹塑性理论还处于研究和发展阶段,如何处理各种因素对结构抗震性能的影响则还要做许多工作,尤其是如何通过实验的方法对它进行检验更是如此,所以如何在概率弹塑性理论发展中科学合理地应用抗震实验技术还存在许多问题。因为概率弹塑性理论是基于随机方法建立的,它是一种概率意义下的行为,而实验是它的一次确定性样本,如何将二者合理地联系在一起目前还存在一定的困难;另外地震波的选择也是一个重要而未能解决的问题,因为每个地震波记录都不能代表地震动的一般性;还有其它因素诸如结构本身、基础状况和土壤特征等都将影响到地震动的输入,所有这些都是抗震实验中有待于解决的问题。

1.2 结构抗震实验的方法

到目前为止,国内外已经出版了许多结构实验方面的教材和专著^[13~20],还有一些是专门论述模型结构实验的^[21~26],而且我国还先后制定出相应的混凝土结构试验方法标准和建筑抗震试验方法规程^[27~29]。但是,专门讨论结构抗震实验方法的书籍非常少,朱伯龙教授主编的《结构抗震试验》是目前唯一的一本^[30],许多抗震实验方法和应用的内容则被写入了地震工程学或结构抗震设计的著作中^[12,31~34],而更多的与抗震实验方法及其应用有关的研究成果则发表于专业期刊和会议论文集中,尤其是拟动力实验方法和应用的内容主要是以论文的形式出现的^[35~38]。下面列出的主要是三种在实验室进行的拟静力实验方法、地震模拟振动台实验方法、拟动力实验方法和与之密切相关的内容,这三种实验方法也是本书的核心内容。

1.2.1 拟静力实验方法

拟静力实验方法几乎可以应用于各种建筑结构或构件的抗震性能研究;与振动台实

验和拟动力实验相比,拟静力实验方法的突出优点是它的经济性和实用性,经济性原因使它具有应用上的广泛性。从实验设备和设施来看,它的要求是比较低的,并不需要昂贵的实验设备;从试件的花费来看,拟静力实验的构件往往比一个模型结构实验的花费低十几甚至几十倍。另外,由于拟静力实验中不考虑应变速率影响所产生的变化,因此不同研究人员在不同实验室获得的实验结果就容易进行比较,这是拟静力实验的一个优点。

拟静力实验有两方面的意思,一是它的加载速率很低,从而应变速率的影响可以忽略;另一个是拟静力实验既代表着单调加载又代表着循环加载,单调加载可以认为是循环加载的一种特例。通常拟静力实验又称为周期性加载实验,主要是指循环加载实验这层意思,所以许多情况下并不严格区分拟静力实验或周期性加载实验。虽然拟动力实验的加载速率与拟静力实验是一样的,但是拟动力实验的加载目标与拟静力实验的加载目标在确定上具有本质的不同,所以二者不能归入同一类中。

1.2.2 地震模拟振动台实验方法

地震模拟振动台可以真实地再现地震过程,是目前研究结构抗震性能最准确的实验方法。从60年代建造地震模拟振动台开始,到目前全世界已经拥有近百台中型以上的地震模拟振动台,其功能也从当年的单向发展成为目前的三向六自由度的地震模拟振动台,控制系统的性能也随着科学技术的发展得到了很大的提高,从过去的PID调节控制、三参量反馈控制发展到了自适应控制阶段。

地震模拟振动台实验主要用于检验结构抗震设计理论、方法和计算模型的正确与否,尤其是许多高层结构和超高层结构都是通过缩尺模型的振动台实验来检验设计和计算结果的。事实上,只要试件的重量、尺寸和反应特征处于振动台的最大功能范围之内,都可以进行振动台实验;台面再现的波形也不仅仅限于地震波,可以是其它类型的振动问题。所以采用振动台进行实验的不仅有建筑结构,也有桥梁结构、离岸结构、水工结构以及工业产品和设备等。

1.2.3 拟动力实验方法

拟动力实验又称为联机实验,是将计算机的计算和控制与结构实验有机地结合在一起的一种实验方法,它与采用数值积分方法进行的结构非线性动力分析过程十分相似,与数值分析方法不同的是结构的恢复力特性不再来自于数学模型,而是直接从被试结构上实时测取。拟动力实验的加载过程是拟静力的,但它与拟静力实验方法存在本质的区别,拟静力实验每一步的加载目标(位移或力)是已知的,而拟动力实验每一步的加载目标是由上一步的测量结果和计算结果通过递推公式得到的,而这种递推公式是基于被试结构的离散动力方程,因此实验结果代表了结构的真实地震反应,这也是拟动力实验优于拟静力实验之处。

虽然拟动力实验和地震模拟振动台实验可以获得结构的真实地震反应,但是由于输入地震波的选择是任意的,所以被试结构的真实地震反应将随输入的不同而不同。

1.2.4 原型结构的动力测试

原型结构动力测试作为了解实际结构动力特性的一种方法是十分重要的。动力特性

对于深入了解结构的抗震能力,检验结构的性能是非常有效的手段。特别是对于高层建筑,由于结构刚度小、动态作用比较敏感,所以动力测试不仅检验现有的设计和分析结果,对该结构将来的性能评估也提供了重要的依据^[40]。

大型桥梁,尤其是悬索桥和斜拉桥这类大跨度桥梁也是需要进行动力测试的^[41,42],目前不仅对这类大跨度桥梁建成后进行动力测试,而且在桥梁服役过程中进行长期的振动监测也已经成为桥梁工程研究的重要内容^[42,43],像美国的金门大桥和香港的青马大桥等都安装了长期监测系统,以便进行桥梁长期的抗风和抗震监测。

1.2.5 数据采集与处理

为了研究结构的性能,需要记录结构在实验过程中的各种变化,一般结构抗震实验中需要量测和记录的有位移、速度、加速度、应变和力等。只有通过量测和记录这些表征结构特性的信号才能达到进一步分析确定结构性能的目的。这种对信号的量测和记录过程称之为数据采集。目前所说的数据采集,主要是指将现实世界中的各种模拟信号变换成电压或电流信号,然后再经过 A/D 转换器转换成数字信号供计算机处理的过程。抗震实验中数据采集的一个突出特点是要求采集过程与实验控制过程协调一致,例如在拟动力实验中,每一步加载完成后都要进行数据采集,这样才能与输入的地震动对应起来。数据采集的另一项重要用途是实验过程的实时监测,像拟静力实验和拟动力实验过程,根据量测的数值和相关的曲线变化规律,可以实时地了解结构的开裂、屈服和破坏过程。

数据采集的目的是分析结构的反应情况,为了达到这一目的需要进行数据处理,从采集的数据中获得我们所需要的内容。由于计算机技术的迅速发展,目前已经出现了许多功能强大的数据处理软件,数据处理工作可以非常方便地用这些数据处理软件来完成。像 Excel 不仅具有图表功能而且具有很强的数理统计分析功能;DADiSP 是另一个功能非常完善的特别适合于处理动态信号的软件,具有频谱分析功能、数学计算功能和统计分析功能等一系列分析手段。有这些数据处理软件的支持,抗震实验的数据处理工作通常都可以顺利地完成。

1.2.6 模型实验理论问题

模型实验理论是结构实验的基础,它是模型结构和原型结构之间相互联系的一座桥梁,直接影响到结构模型实验结果的推广应用。由于实验条件如实验室的规模、反力墙的高度、振动台的尺寸大小等的限制,同时为了能够进行整体结构的实验而不得不采用缩尺模型,有时模型要缩成很小的比例,特别是对高层建筑结构、塔桅结构、桥梁结构和水坝等更是如此。因此模型相似理论是模型实验中的一项关键内容,由于材料的力学性能、模型结构的制造误差以及模型结构的非线性反应,模型相似理论往往得不到满足,所以不能将小比例模型结构的实验结果直接用于原型结构。尽管如此,由于模型实验满足了结构的主要相似关系,所以实验结果可以定性地反映出原型结构的一些特征。目前结构的非线性动力相似理论还不完备,它直接影响到结构抗震实验结果的推广应用,所以这是一个需要尽快解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 工程地震文献资料编辑委员会编,工程地震文献选集,第一集,建筑工程出版社,北京,1959。

- [2] 武藤清著,滕家禄等译,建筑物动力设计,中国建筑工业出版社,1984。
- [3] R. T. Reese and W. A. Kawahara, Handbook on Structural Testing, The Fairmont Press INC., 1993.
- [4] J. A. Blume, A Machine for Setting Structures and Ground into Forced Vibrations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 25, 1935.
- [5] R. T. Leon and G. G. Deierlein, Considerations for the Use of Quasi-Static Testing, Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 1, February 1996.
- [6] N. M. 纽马克, E. 罗森布卢斯著,叶耀先等译,地震工程学原理,中国建筑工业出版社,1986。
- [7] 国家地震局工程力学研究所编,刘恢先地震工程学位论文选集,地震出版社,1994。
- [8] 龚思礼等编,建筑抗震设计,中国建筑工业出版社,1994。
- [9] 刘大海、扬翠茹、钟锡根编著,高层建筑抗震设计,中国建筑工业出版社,1993。
- [10] 黄浩华,地震工程研究中的振动试验方法和仪器设备,中国地震工程研究进展,地震出版社,1992。
- [11] K. Takanashi and M. Nakashima, Japanese Activities on On-Line Testing, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 113, No. 7, July 1987.
- [12] 胡聿贤著,地震工程学,地震出版社,1988。
- [13] 翁兆祥编著,结构试验,建筑工程出版社,1958。
- [14] 哈尔滨建筑工程学院,建筑结构试验,中国工业出版社,1961。
- [15] 湖南大学,太原工业大学,福州大学,建筑结构试验,中国建筑工业出版社,1982。
- [16] 王济川,建筑结构试验指导,中国建筑工业出版社,1985。
- [17] 林圣华编,结构试验,南京工学院出版社,1987。
- [18] 王炯明,建筑结构试验,清华大学出版社,1988。
- [19] G. M. Sabnis, H. G. Harris, R. N. White and M. S. Mirza, Structural Modelling and Experimental Techniques, Prentice-Hall, Inc., 1983.
- [20] Dynamic Behaviour of Concrete Structures, Edited by G. P. Tilly, Elsevier Science Publishers B. V., 1986.
- [21] E. 富马加利著,将彭年、彭光履、赵欣译,静力学模型与地力学模型,水利电力出版社,1979。
- [22] H. 霍斯多尔夫著,徐正忠、陈安息、曾盛奎译,结构模型分析,中国建筑工业出版社,1986。
- [23] H. G. 哈里斯编,朱世杰译,混凝土结构动力模型,地震出版社,1987。
- [24] 李德寅、王邦楣、林亚超编著,结构模型实验,科学出版社,1996。
- [25] 梅村魁、青山博之、伊藤胜著,林亚超、卢世深译,结构试验和结构设计,人民交通出版社,1980。
- [26] F. W. David and H. Nolle, Experimental Modelling in Engineering, Mansell (Bookbinders) Ltd., 1982.
- [27] 中华人民共和国国家标准,混凝土结构试验方法标准(GB50152-92),中国建筑工业出版社,1992。
- [28] 沈在康编著,混凝土结构试验方法新标准应用讲评,中国建筑工业出版社,1991。
- [29] 中华人民共和国行业标准,建筑抗震试验方法规程(JGJ 101-96),中国建筑工业出版社,1997。
- [30] 朱伯龙主编,建筑抗震试验,地震出版社,1989。
- [31] 李杰、李国强编著,地震工程学导论,地震出版社,1992。
- [32] 若林实著,成源华、朱君道译,房屋抗震设计,同济大学出版社,1991。
- [33] M. J. N. 普瑞斯特雷、F. 塞勃勒、G. M. 卡尔维著,袁万城、胡勃、崔飞、韦晓等译,桥梁抗震设计与加固,人民交通出版社,1997。
- [34] 范立础编著,桥梁抗震,同济大学出版社,1997。
- [35] S. A. Mahin, P. B. Shing, C. R. Thewalt and R. D. Hansn, Pseudodynamic test Method-current status and Future Directions, J. Struct. Engrg., ASCE, 115(8), 1989.
- [36] P. B. Shing, M. Nakashima and O. S. Bursi, Application of Pseudodynamic Test Method to Structural Research, Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 1, February 1996.
- [37] 易伟建,工程结构拟动力试验的应用与发展,结构工程科学发展青年专家研讨会论文集,1992年8月,哈尔滨。
- [38] 邱法维,拟动力实验方法与实验技术的发展,结构工程科学发展青年专家研讨会论文集,1992年8月,哈尔滨。
- [39] 邱法维、钱稼茹,拟动力实验方法的若干应用,工程力学, Vol. 16, No. 1, 1999, 78~88 页。
- [40] 清华大学土木系,香港理工学院土木及结构工程系,香港几幢高层建筑的脉动试验,清华大学出版社,1985。

- [41] 铁道部大桥工程局桥梁科学研究所编, 悬索桥, 科学技术文献出版社, 1996。
- [42] 林元培编著, 斜拉桥, 人民交通出版社, 1997。
- [43] Proceedings of the International Workshop on Civil Infrastructure Systems: Application of Intelligent Systems and Advanced Materials on Bridge Systems, Edited by G. C. Lee and K. C. Chang, Technical Report NCEER-94-0019, July 18, 1994.