

单层厂房震例 及其应用

吴育才
黄宗明 著
王金海

山东科学技术出版社

单层厂房震例及其应用

吴育才 黄宗明 王金海 著

山东科学技术出版社

内 容 简 介

本书是一部系统阐述震例分析理论及其应用的专著，论述了震例在抗震理论发展中的作用，归纳了三类分析震例的方法，即统计分析法、广义输入输出时程分析法和有输入输出记录的时程分析法；定量分析了106个震例，通过这些震例的分析数据，提出了钢筋混凝土阶形柱的上柱是抗震中的薄弱环节等独特见解；论述了应变速率在抗震中的影响；介绍了变形计算在抗震中的意义和步骤；以照片和图表形式列举了348个单层厂房震例；在附录中列举了空间杆系及振型分解设计谱法计算实例和3个微机源程序。本书可供工程抗震和结构专业的研究生及科研和设计工作者参考与应用。

单层厂房震例及其应用

吴育才 黄宗明 王金海 著

*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码250002)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂德州厂印刷

*

787×1092毫米16开本·22.25印张8插页 470千字

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数：1-1000

ISBN7-5331-0916-3/TB·12

定价 16.50 元

“泰山科技专著出版基金”
顾问、评审委员会、编辑委员会

顾问 宋木文 伍 杰 苗枫林

评审委员会 (以姓氏笔画为序)

卢良恕 吴阶平 杨 乐 何祚庥 罗沛霖 高景德
唐敖庆 蔡景峰 戴念慈

编辑委员会

主任委员 杜秀明 石洪印

副主任委员 梁 衡 邓慧方 王为珍

委 员 (以姓氏笔画为序)

邓慧方 王为珍 卢良恕 石洪印 刘韶明 吴阶平
杨 乐 何祚庥 杜秀明 罗沛霖 林凤瑞 唐敖庆
高景德 梁 衡 梁柏龄 蔡景峰 戴念慈

我们的希望(代序)

进行现代化建设必须依靠科学技术。作为科学技术载体的专著，正肩负着这一伟大的历史使命。科技专著面向社会，广泛传播科学技术知识，培养专业人才，推动科学技术进步，对促进我国现代化建设具有重大意义。它所产生的巨大社会效益和潜在的经济效益是难以估量的。

基于这种使命感，自1988年起，山东科学技术出版社设“泰山科技专著出版基金”，成立科技专著评审委员会，在国内广泛征求科技专著，每年补贴出版一批经评选的科技著作。这一创举已在社会上引起了很大反响。

但是，设基金补助科技专著出版毕竟是一件新生事物，也是出版事业的一项改革。它不仅需要在实践中不断总结经验，逐步予以完善；同时，也更需要社会上有关方面的大力扶植，以及学术界和广大读者的热情支持。

我们希望，通过这一工作，高水平的科技专著能够及早问世，充分显示它们的价值，发挥科学技术作为第一生产力的作用，不断推动社会主义现代化建设的发展。愿“基金”支持出版的著作如泰山一样，耸立于当代学术之林。

泰山科技专著评审委员会

1989年3月

前 言

任何一门学科的理论都是从社会实践中归纳、提炼而成的，并且不断受到实践的检验与完善，抗震理论也不例外。抗震理论的实践是多渠道的，有实验室的科学试验，有现场的模拟试验与实验测定，还有经受地震作用的建筑物反应——震例。这三种实践各有特点，不能互相替代，只有震例才能全面、真实地反映地震对建筑物的作用，其实践环境是其他任何实践无法获得、也难以模拟的。因此，震例是研究抗震理论最根本、最宝贵、最可靠的实践。当其他实践与震例有矛盾时，作者认为应以震例为准。

尽管全世界每年要发生上百万次地震，有破坏性的也要超过百次，但真正能用于定量分析的震例为数不多。已发表的震例资料，大部分都是对破坏实物的综合性描述或总结，且缺乏建筑物的原始资料。它们作为定性分析的资料诚然十分可贵，却很难从定量计算的要求来应用。本书提供了作者近十多年来所收集的一批具有详细原始资料的单层厂房震例，这只是人类与自然灾害作斗争的丰富资料的一部分。单层厂房的计算简图与实际情况最为接近，相似的建筑物数量较多，这对研究抗震规律十分有利。希望这些资料能为广大抗震工作者共同利用，为持有各种学术观点的抗震研究者提供原始材料，为推动抗震理论的发展作出贡献。

科学的定量分析是最有效利用震例资料的必要手段，现代数学和计算技术的发展为震例分析注入了新的内容。自1976年唐山大地震以来，国内的震例分析工作呈现出百花齐放的景象。本书将震例的定量分析方法归纳成三大类，即统计分析法、广义输入输出时程分析法及有输入输出记录的时程分析法。书中较详细地介绍了前两类方法的理论基础及其在震例分析中的应用，并附有几个实用的微机源程序及计算实例。这些理论和方法已经渗透到整个工程抗震领域，成为抗震研究工作者不可缺少的重要基础知识。

作为震例分析方法及其具体应用，书中介绍了第一作者的部分研究成果，其中一些见解与成果已为城市抗震防灾及抗震设计规范所吸取。这些工作当然只是局部的，有些见解不同程度地引起过争论，这对深入探讨抗震理论、充实与丰富抗震设计工作的内容是有益的，还能起到抛砖引玉的作用。

限于作者水平，书中不足之处在所难免，诚恳地希望读者不吝赐教。

本书得到叶耀先、陈寿梁、魏琰、胡聿贤、龚思礼，以及机械电子部设计研究院负责同志的大力支持。叶耀先同志全面审阅了本书，胡连文、高小

旺、陈昶同志提出了许多宝贵意见，中国科学院计算技术研究所的王振华同志审阅了部分内容，特此深表谢意。

吴育才 黄宗明 王金海

1991. 4

Preface

The scientific theory of any subject is derived from practical observations, and it is then constantly examined and perfected by social practice. The same is true to aseismic theory. Practical observations for aseismic theory are multidimensional. They can be obtained from (a) model tests in laboratories, (b) simulation tests or measurements at building sites, (c) damaged buildings in earthquakes. These three types of observation have clear distinctions and are not interchangeable, but only the third one is all-sided and a true reflection of the effects of earthquakes on buildings. The environmental conditions of buildings under an earthquake can not be truly simulated by any other means. Therefore, the authors hold that earthquake-damaged buildings provide the most fundamental and reliable observations, and the information from such sites should serve as the ultimate criterion when discrepancies arise between conclusions derived from them and those from other types of observations.

Each year there are about one million earthquakes in the world, among which more than one hundred have the potential of damaging buildings. But, most of the publications available about earthquake-damaged buildings are of descriptive summaries or conclusions of the damage phenomenon and lack the details of the original design parameters of the buildings. Consequently, although the information from these publications is valuable for qualitative analysis, it is difficult to be used further for quantitative studies. This book provides several groups of data of earthquake-damaged single-storey mills with detailed original design parameters. These have been collected by the first author in the last ten years, and are part of the wealth of information obtained in fighting against natural disasters. We publish them with the hope of their being shared by all the researchers in the engineering seismology field to promote the development of aseismic theory. The mechanical models of single-

story mills conform well to their actual structures, and there exists a lot of buildings with similar mechanic features. This makes the data presented here valuable in searching for general aseismic rules.

In order to take good advantage of the data of earthquake-damaged buildings, reasonable analytical methods are necessary. In China, since the destructive Tangshan earthquake in 1976, many new kinds of analytic methods have emerged as a result of the development of modern mathematics and computer technology. In this book we place these methods into three classes. They are: statistics method, generalized input and output time-history analysis method, and time-history analysis method with actual input and output records. Some of the representative methods of the three classes are presented. The basic theory and application scope of there are introduced in a clear and simple way. In addition, several computer programs on these methods and detailed discussions of the applications of mathematics and mechanics are also given. In fact, the application of the theories and methods introduced here is not limited to the analysis of data of earthquake-damaged buildings. Their application has penetrated many aspects of the engineering seismology field, and become a basic skill of researchers in related fields.

In chapter 3 and 5, on the application of the methods and data presented, some of the research results of the author have been included. Some views and results proposed by the first author here have been adopted by the Urban Seismic Risk Mitigation Project and the Seismic Design Code, respectively. The work was, indeed, only partial, but the controversies which it caused had, to some extent, the function of "brick cast to attract jade" and are still helpful in understanding the relevant earthquake-resistant theory.

The authors are deeply grateful to professors Ye Yaoxian, Chen Shouliang, Wei Lian, Hu Yuxian, Gong Sili and directors of Design and Research Institute of Ministry of Mechine- Building Industry, who have provided me with invaluable help in writing this book. The authors are greatly appreciative of the advice and comments given by Ye Yaoxian who has approved the whole book, and all

the comments given by Hu Lianwen, Gao Xiaowang, Chen Chang
and Wang Zhenhua. To all these the authors are sincerely indebted.

Wu Yucai, Huang Zongming, Wang Jinhai

April 1991.

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 震例在抗震理论发展中的作用	(2)
第二节 6 度区的抗震设防	(3)
第三节 震例提供的经验	(4)
第四节 震例定量分析方法	(5)
第二章 统计分析法的理论基础	(9)
第一节 逐步回归法	(9)
第二节 模糊综合评判法	(22)
第三章 统计分析法的应用	(33)
第一节 概述	(33)
第二节 确定回归方程	(35)
第三节 验证回归方程	(41)
第四节 改进回归方程	(44)
第五节 预测方法及步骤	(48)
第四章 广义输入输出时程分析法的理论基础	(49)
第一节 输入问题	(50)
第二节 单层厂房的计算模型	(68)
第三节 动力方程的建立和求解	(87)
第四节 输出问题	(98)
第五章 广义输入输出时程分析法的应用	(104)
第一节 震例的选择及分析	(104)
第二节 地震作用	(111)
第三节 设计谱	(115)
第四节 抗震中单层厂房阶形柱的薄弱环节	(121)
第五节 应变速率的影响	(135)
第六节 变形计算	(147)
第六章 震例实录	(152)
第一节 图表震例	(152)
第二节 照片震例	(284)
附录一 逐步回归法源程序	(286)
附录二 生成人工地震波的源程序	(292)
附录三 钢筋混凝土偏压构件多折线骨架曲线MULINE源程序	(304)
附录四 空间杆系计算实例	(311)

附录五 振型分解设计谱法计算实例	(325)
参考文献	(335)
后记	(340)

EARTHQUAKE DAMAGE CASES AND THEIR STUDIES FOR SINGLE STORY INDUSTRIAL BUILDINGS CONTENTS

CHAPTER 1 GENERAL INTRODUCTION	(1)
SECTION 1 The Importance of Earthquake Damage Case Studies in the Development of Earthquake Engineering	(2)
SECTION 2 Earthquake Resistant Consideration in the Regions with Intensity of VI	(3)
SECTION 3 The Experiences learned from Earthquake Damage Case studies	(4)
SECTION 4 The Introduction of Quantitative Analysis of Earthquake Damage	(5)
CHAPTER 2 FUNDAMENTAL THEORY OF STATISTICAL METHOD....	(9)
SECTION 1 Stepwise Regression Method	(9)
SECTION 2 Fuzzy Comprehensive Evaluation Method	(22)
CHAPTER 3 STATISTICAL METHOD APPLIED TO EARTHQUAKE DAMAGE ANALYSIS	(33)
SECTION 1 Introduction	(33)
SECTION 2 Choice of Regression Equation.....	(35)
SECTION 3 Verification of Regression Equation	(41)
SECTION 4 Improvement of Regression Equation	(44)
SECTION 5 Damage Prediction Method	(48)
CHAPTER 4 FUNDAMENTAL THEORY OF GENERALIZED INPUT AND OUTPUT TIME-HISTORY ANALYSIS.....	(49)
SECTION 1 Input Ground Motion.....	(50)
SECTION 2 Mathematical Model of Single Story Industrial Buildings	(68)
SECTION 3 Formulation and Solution of the Equation of Motion	(87)
SECTION 4 Output Data.....	(98)
CHAPTER 5 GENERALIZED INPUT AND OUTPUT TIME-HISTORY ANALYSIS APPLIED TO EARTHQUAKE DAMAGE ANALYSIS	(104)
SECTION 1 Reliability of Earthquake Damage Analysis	(104)
SECTION 2 Earthquake Action.....	(111)
SECTION 3 Design Spectrum	(115)
SECTION 4 Weak Part of Step-Column During an Earthquake.....	(121)

SECTION 5	Effect of Strain Rate on Earthquake Response of Structures....	(135)
SECTION 6	Deformation Calculation	(147)
CHAPTER 6	PRESENTATION OF EARTHQUAKE DAMAGE CASES....	(152)
SECTION 1	Related Materials of the Cases	(152)
SECTION 2	Photographs of the Cases.....	(284)
APPENDIX 1	COMPUTER PROGRAM OF STEPWISE REGRESSION PROCEDURE	(286)
APPENDIX 2	COMPUTER PROGRAM OF ARTIFICIAL EARTHQUAKE MOTION	(292)
APPENDIX 3	COMPUTER PROGRAM OF MULINE.....	(304)
APPENDIX 4	EXAMPLE OF SPACE FRAMES.....	(311)
APPENDIX 5	EXAMPLE BY USING MODAL-ANALYSIS WITH DESIGN SPECTRUM	(325)
REFERENCES		(335)
POSTSCRIPT		(340)

第一章 绪 论

我国人民在实践中,率先创造了地震仪。60多年前,多地震国家——日本的学者,从1923年关东大地震和1930年北伊豆地震中,见到较柔性震例的破坏程度轻于较刚性震例的破坏。因而有些学者提出了在地震区采用柔性结构的主张,甚至认为:刚性的砌体结构及较刚性的钢筋混凝土框架结构都不应在地震区采用。1926~1935年之间进行的两个阶段的刚柔之争,发生在对地震波特性尚不十分清楚的时代,当时虽没能得到明确的结论,但柔性派从震例的现象中提出了问题,引起了争论,从而推动了日本抗震界对抗震理论的研究。

我国《抗震规范》74年版、78年版、89年版的三次编制中,从震例总结了许多宝贵经验,采取了众多的抗震措施,在国际上处于领先地位。这些抗震措施几乎都是从对震例的定性分析中归纳出来,再根据经验给出定量界线,但是这些界线还缺乏严密的定量根据。在70年代初期,研究设计谱问题时,就期待从震例中找寻答案。当时国际上已在建筑物上,设置了拾震仪器,记录到地震输入及建筑物上的反应——输出,从而计算、分析、验证并找寻一些抗震规律,这是一种科学而又严密的方法。但要捕捉这些记录,不仅十分费时费事,而且数量不可能多。因此,还应该通过多种途径,探索符合我国国情的应用震例的定量方法。

对震例进行有效的合理的分析,不仅能从中总结出抗震防灾的规律,而且能直接指导震害资料的收集,避免震害调查中的盲目性。

震害常被划分为直接震害和间接震害。直接震害指由地震波直接造成的人身伤亡和财产损失,如各种建筑物、构筑物、桥梁、道路、水利工程、通信工程等的破坏及损失;间接震害指地震发生时或发生后由直接震害所派生出的破坏或损失(又称为次生灾害),如地震引起火灾造成的破坏与损失,交通、电力、电信中断所造成的损失,水库破坏造成的水灾引起的损失,缺乏医疗条件造成的流行性疾病的蔓延,社会不安及动荡造成停工停产的损失等等。从工程结构抗震的观点出发,直接震害又被划分为地基失效造成的破坏和结构振动造成的破坏两大类。地基失效是指由地震引起地基丧失承载能力,基底发生相对位移从而导致结构破坏,如滑坡、地基沉陷、砂土液化等,这类破坏类似于静力破坏,与结构动力特性无关;结构振动破坏则是由于地面运动作用使结构物产生振动,由结构物的惯性力所引起的破坏。通常把这两类破坏分别形象地称为“地下”问题和“地上”问题。本专著所讨论的是直接震害中结构振动造成的震例的分析问题,即“地上”问题。建筑物的振动破坏是地震灾害中最基本的形式,人员伤亡及经济损失主要由建筑物、构筑物的破坏所造成,生命线工程的震害及某些间接震害也在很大程度上受建筑物破坏的影响。

建筑物的形式、材料特性及环境条件千变万化,地面运动的不确定性等种种偶然因素的影响,使建筑物的震害表现出很大的随机性;另一方面,震例分析中许多定量值,

如烈度、震害程度等具有模糊性，如何从错综复杂的震害现象中发现其内在的规律，是广大抗震工作者一直在探索的课题。邢台地震前后，我国的震害调查和分析大都是经验性的。唐山地震以来，随着计算机技术的普及，我国的震害分析已走上适合国情的道路，并取得了有益的成果。

本专著将在本章的前三节中扼要地阐述通过震例的定性分析得到的许多概念与认识及其对抗震理论的发展所起的决定性作用。在本章的第四节概要介绍震例定量分析方法的分类、基本概念及应用背景。

第二章和第三章中分别介绍统计分析法（粗略类）的理论基础及其在震例分析中的具体应用。

第四章和第五章中分别介绍广义输入输出时程分析法（较细类）的理论基础及其在震例分析中的具体应用，并得出一些见解，如设计谱的反常现象、钢筋混凝土阶形柱的上柱是抗震中的薄弱环节等。这些见解曾引起不同程度的争论，从而推动了我国抗震理论的研究工作。

第六章中以照片和图表的形式，提供了348个宝贵的震例资料，供广大抗震工作者享用。

第一节 震例在抗震理论发展中的作用

地震记录是地震动在仪器上的实践。美国加州理工学院的学者们在40年代初期，利用地震记录计算了第一条反应谱。经过大约10年的时间，该校豪逊纳教授根据多条强震记录的反应谱，建立了第一组设计谱。设计谱并不是多条反应谱的统计平均值，而是根据多条反应谱加上工程经验及判断求得的。设计谱与反应谱有着明显的差别，前者代表预先估计的地震波作用在实际建筑物上的当量荷载，后者代表着地震波作用在理想单质点体系上的当量荷载。历次大地震中的震例，又不断地检验与完善着设计谱。

我国河北省邢台地区，1966年3月先后发生6.8级和7.2级两次大地震，这个地区的房屋大部分毁坏。人们总结出了“地基牢一点，屋顶轻一点，连接好一点”的群众性抗震经验，指导重建家园工作。15年后邢台地区又发生了6级地震，结果没倒一间房，没死一个人，这是从震例中吸取的宝贵经验。智利在1935、1939年两次大地震中，房屋变成废墟，数以万计的人死亡，智利人民正是从这两次地震中锻炼了自己，才能经受住1960年又一次8.9级特大地震的袭击。设计中考虑地震作用的新建房屋大多完好，震中附近的一座年产量为45万吨的现代化钢厂仅遭受到极轻微的损伤，震后一个星期就恢复了生产。在1964年的阿拉斯加大地震中，人们看到了地震对城市袭击的危害性，逐渐形成了今天的城市抗震防灾规划的新学科。1976年的唐山大地震对唐山市的毁灭性破坏，使80年代初期开始的我国城市抗震防灾规划，象雨后春笋般地在全国范围内展开。在1971年的圣·费尔南多地震中，接近震中的洛杉矶市，道路、桥梁、电讯以及城市其他公用设施的破坏，严重地影响了震后的救灾及恢复重建工作，引出了生命线工程的新的抗震分支。凡此种种，说明地震动中的房屋、桥梁、公用设施的震例推动了抗震理论和各种类型抗震工作的发展。

第二节 6度区的抗震设防

在我国抗震史上,历来认为6度区不要考虑地震设防,在工程设计中不需考虑抗震措施及增加抗震费用。建国初期,由于国家经济处在恢复阶段,曾规定一般建筑物在7、8度区暂不设防。后来人们从多次地震的震例中收集了大量的事实与数据,改变了这一传统规定。

一、6度区的地震实践

1. 6度区多次发生大于6度的地震

建国以来,我国6度区共发生13次大于6度的地震,有3次是7级以上的大地震,其中两次是发生在工业比较集中的城市地区,这两次死亡人数占历次地震中全部死亡人数的92%,倒塌房屋占历次地震中全部倒塌房屋的91%,直接经济损失占历次地震中全部直接经济损失的3/4左右。这当然是地震烈度区划工作中的问题,但从当前地震预报的现状以及抗震的角度,也是有必要给予考虑的。

2. 6度区遭受6度地震作用的震害

1978年6月14日,宁夏地区的西吉遭受6度地震作用,房屋倒塌63间,震坏610间。1983年4月3日,河北省万全县遭受6度地震作用,震坏房屋25.7万米²。1984年江苏省勿南沙地震中,南通市遭受6度地震作用,死亡3人,500户的房屋部分倒塌,海门县震毁房屋1000多间。

3. 震例表明的设防意义

鉴于目前地震预报尚未达到可靠、成熟的阶段,因而很难断定在低烈度区不发生高烈度的地震。震例表明,抗震设防与否对建筑物的抗震能力有着质的影响。例如,唐山面粉厂是套用7度区乌鲁木齐市面粉厂的图纸,遭受唐山大地震袭击后,虽有破坏,但没有倒塌。可以推论,6度区的抗震设防,对提高7、8度地震区的建筑物抗倒塌能力,必将有很大的作用。再者,6度区建筑物遭受6度地震作用时,也有很多破坏,甚至倒塌。说明6度区考虑抗震设防是顺理成章的事。

二、6度区抗震设防的决策过程

6度区是否设防,不仅取决于有无震害,还取决于人们对多次地震的总结和认识过程以及通过震例所做的经济分析。

首先在1979年,鉴于邢台、海城、唐山三次大地震的发生及地震预报部门的震情分析,提出了在9个近期有可能发生地震的6度区城市中开展抗震工作。经过5年左右的实践,1984年的全国抗震会议讨论并提出了“地震基本烈度6度区重要城市抗震设防和加固的暂行规定”对全国6度区的重要工业城市、省会及百万人以上的大城市的抗震问题作了规定。又经过一段时间的实践、酝酿和讨论,对新建房屋的设计、原有房屋的加固及整个城市的抗震防灾都作了具体规定,从而使6度区的抗震设防问题全部具体化。这一决策过程正是基于对多次大地震实践的总结。