

馆藏文物防震保护研究

[美] Jerry Podany 编

吴来明 葛家琪 马伯涛 黄河 编译



科学出版社

馆藏文物防震保护研究

〔美〕 Jerry Podany 编

吴来明 葛家琪 马伯涛 黄河 编译

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书论述馆藏文物的防震保护,包括国际研究进展和国内研究进展两部分。国际研究进展部分译自专题研讨会论文集《馆藏文物防震保护研究进展》,内容涉及馆藏文物防震保护理念和震害机理,包含从典型馆舍到具体文物、从简单经济方法到现代减隔震技术等各种各样的防震措施和案例。国内研究进展部分编录了本书编译团队的相关研究项目论文,内容包括上海博物馆陈列文物防震研究、5·12汶川地震后博物馆防震减灾调研、成都博物馆新馆结构抗震、地铁等轨道交通振动对馆藏文物的影响,以及《馆藏文物防震规范》等。

本书适合文物保护研究人员、文物保管与陈列设计人员、博物馆建筑设计和建设人员、文物保护专业本科生及研究生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

馆藏文物防震保护研究/(美)杰瑞·普丹尼(Jerry Podany)编;吴来明等编译. —北京:科学出版社,2018.10

书名原文:Advances in the Protection of Museum Collections from Earthquake Damage

ISBN 978-7-03-058972-9

I. ①馆… II. ①杰… ②吴… III. ①博物馆-文物保护-地震预防-研究 IV. ①G264.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 224096 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:何艳萍

责任印制:师艳茹 / 封面设计:铭轩堂

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>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年10月第一次印刷 印张:23 1/2

字数:464 000

定价:298.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

编译者序

中国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间,地震活跃,强震频发。据统计,近年来我国年均发生有感地震逾 700 次,20 世纪以来 6 级以上强震发生近 500 次,涉及省份多达 28 个,其中 8 级以上地震发生 10 余次。地震灾害不仅危及人身安全,而且对文物保护构成巨大的威胁。博物馆是文物的主要收藏机构,截至 2016 年底,全国登记注册的博物馆有 4873 家,其中列入国有一到三级博物馆共计 730 家,这些博物馆中有约 70% 是处在 7 度及以上抗震设防的强震多发区。大量珍贵文物集中在博物馆中保存,有利于日常保护和管理,但地震波经历场地、馆舍、展柜及展具或储藏设施等传递到文物,任何一个环节出现震损均会危及文物安全,如果不加重视,忽略文物陈列和收藏各个环节的全系统防震保护,势必对馆藏文物造成重大危害。2008 年 5·12 四川汶川 8.0 级地震、2010 年 4·14 青海玉树 7.1 级地震、2013 年 4·20 四川芦山 7.0 级地震均出现了“馆舍好但展柜坏”、“展柜好但文物坏”、“考虑防震但文物还坏”等各种问题,造成大量馆藏文物的灾难性破坏。因此,我国馆藏文物防震保护形势严峻,需求迫切,研究、开发和应用任务十分艰巨。

当前,我国的文物保护工作逐步从注重抢救性保护向抢救性与预防性保护并重转变。作为文物预防性保护的重要方面,馆藏文物防震保护工作得到了国家和主管部门的高度重视,列入了 2016 年 3 月颁布的《国务院进一步加强文物工作的指导意见》和国家文物事业发展“十二五”及“十三五”规划。国家文物局推动开展一系列文物防震保护技术研究项目,组织编制《博物馆建设标准》、《馆藏文物防震规范》和《馆藏文物防震 防震装置 技术要求》等系列规范标准,与工业和信息化部建立文物保护和传承专用装备产业化和应用协作机制,将馆藏文物防震专用装备列入首批(2013 年)重点发展方向。至今已经取得初步成果,有效防止了 2015 年 1 月 14 日四川乐山 5.0 级地震对雅安市博物馆展陈文物的危害,并继续资助在四川雅安市博物馆、云南省博物馆、成都博物馆等单位实施标准化示范项目。但是,我国馆藏文物防震保护研究起步较晚,实践应用经验明显不足。本书的编译出版,旨在当前我国政、产、学、研、用联合推进文物防震保护工作的大发展时期,向更多的、跨学科的馆藏文物防震保护人员提供国内外积极探索的保护方法和应用案例。

本书由国际研究进展和国内研究进展两部分组成,第一部分译自于专题研讨会论文集《馆藏文物防震保护研究进展》,第二部分编录了本书编译团队的相关研

究项目论文。

在国际研究进展方面,2006年5月美国盖蒂博物馆在改造开馆之际组织召开“馆藏文物防震保护”学术研讨会,至今仍然是国际文物保护界最负盛名的一次会议,对于推动世界范围内防震技术在博物馆中的应用和发展发挥了积极的作用。会议论文集发表了希腊、日本、土耳其、印度和美国等主要地震频发国家和地区在馆藏文物防震减灾方面取得的成绩和经验,涉及馆藏文物防震保护理念和震害机理,从典型馆舍到具体文物、从简单经济方法到现代减隔震技术等各种各样的防震措施和案例,具有广泛的参考价值。国内研究进展方面,从1999年上海博物馆陈列文物防震保护技术系列研究和应用开始,本书编译团队围绕2008年国家文物局下达的文物保护行业标准《馆藏文物防震规范》研究编制任务,以及馆藏文物“设防地震波+建筑(楼层反应谱)+展柜(展台反应谱)+文物”全系统防震安全设计理念研究提出,通过5·12汶川地震后博物馆防震减灾调研,以及成都博物馆新馆结构抗震、地铁等轨道交通振动对馆藏文物的影响等馆藏文物防震保护研究和实践,展现我国馆藏文物保护技术研究逐步发展到形成规范的历程。

《馆藏文物防震保护研究进展》编者 Jerry Podany 先生建议中国学者也能够发起召开馆藏文物防震保护学术研讨会,这一提议与我们正在着手的计划相一致。于是,“首届博物馆文物展防震技术国际学术研讨会”于2015年4月13日至17日在北京和上海召开, Jerry Podany 先生在国际会议代表的邀请上给予了大力支持。2015年11月24日至28日又在上海和四川省北川县召开了“中日韩文物防震国际学术研讨会”。我们期望在2018年10月的“第二届博物馆文物防震技术国际学术研讨会”召开之际能够向大家奉献本书。

最后,需要致谢的是,国家文物局博物馆与社会文物司(科技司)向我们赠送了《馆藏文物防震保护研究进展》原版论文集,并支持和指导《馆藏文物防震规范》研究编制项目,使研究工作得到许多有益的参考。美国盖蒂博物馆、Jerry Podany 先生及各位论文作者对论文集翻译出版给予了慷慨授权。在论文集授权联系和前期翻译过程中得到杨维国教授团队的大力支持和帮助。中国航空规划设计研究总院葛家琪研究员团队、翻译室的研究人员在论文集翻译和全书排版中付出了大量时间和精力。上海博物馆黄河副研究员负责了论文集前期校译和出版统筹工作。全书最终由吴来明、马伯涛负责终审校译和统稿。

编译者

于2018戊戌年春

目 录

编译者序

第一部分 国际研究进展

《馆藏文物防震保护研究进展》前言	3
挑战	4
地震学的新发展:洛杉矶地区的地表运动环境	9
隔震和减震系统:提高建筑的抗震性能	26
历史建筑地震保护的发展	29
印度地区博物馆及其藏品的防震保护	41
防震装置制作:回顾盖蒂博物馆展品防震保护	47
盖蒂博物馆文物隔震支座的设计定型	73
罗丹“地狱之门”的隔震研究	85
伊斯坦布尔博物馆的防震研究	97
旧金山亚洲艺术博物馆防震研究	108
案例研究:希腊博物馆防震减灾工作成果回顾	117
奥林匹亚考古博物馆赫尔墨斯雕像的隔震系统	130
西雅图艺术博物馆的防震应用	141
案例研究:保管员在洛杉矶郡艺术博物馆艺术品防震减灾中的责任	160
加利福尼亚州立公园中历史性住宅及其藏品的防震保护	176
临时展品抗震保护:启蒙运动时期的雕刻家——让·安托万·乌东作品展	189
微晶石蜡在艺术品防震保护中的预期性能	201
案例研究:伊萨卡岛博物馆的低成本减震方法	209
论文集致谢	214

第二部分 国内研究进展

博物馆文物的防震保护研究(一)——传统抗震措施与现代隔震技术	217
博物馆文物的防震保护研究(二)——设防地震动输入及结构地震动反应	228
博物馆文物的防震保护研究(三)——陈列文物的地震安全性分析	249
博物馆文物的防震保护研究(四)——隔震装置的研制和实验评价	265
成都博物馆防震性能化设计研究	288
地铁所致成都博物馆振动全过程性能化研究	304

地铁所致成都博物馆振动振源减振研究·····	320
5·12汶川地震中四川可移动文物及其建筑受损情况调查·····	333
5·12汶川地震中四川可移动文物受损原因分析·····	346
《馆藏文物防震规范》关键技术——防震安全设计研究·····	358
《馆藏文物防震规范》(WW/T 0069—2015)简介·····	367

第一部分 国际研究进展

本书第一部分译自于：

《馆藏文物防震保护研究进展》

Advances in the Protection of Museum Collections from Earthquake Damage

召开于盖蒂博物馆的研讨会论文集

(2006年5月3、4日)

Papers from a Symposium Held at the

J. Paul Getty Museum at the Villa on

May 3-4, 2006

论文集主编：杰瑞·普丹尼

Jerry Podany, Volume Editor

《馆藏文物防震保护研究进展》前言

在“馆藏文物防震保护”学术研讨会召开两周前，刚刚举办了公元 1906 年美国旧金山大地震百年纪念活动。那场几乎摧毁这座美国著名城市的浩劫，永远地带走了诸多美丽的建筑和文化遗迹，同样逝去的还有无数鲜活的生命，如今它再一次赫然出现在报纸头条并浮现在我们的脑海中。悲剧已成事实无法改变，而大部分人所认知的现代地震学和防震减灾研究却发端于此。

今年研讨会的召开恰逢旧金山大地震百年纪念，同时也是坐落于盖蒂别墅的盖蒂博物馆改造后开馆的第一年。我馆盛邀来自世界各地的专家，包括工程师、地震学家和博物馆业内人士，讨论博物馆和收藏单位中馆藏文物防震减灾的保护难题。研讨会群贤毕至，来自全球各地震频发国家并深感博物馆藏品饱受地震灾害威胁的文物保护专家济济一堂。两天的会议过程中，专家们集思广益、畅所欲言，认真讨论了馆藏文物防震减灾取得的成绩、当今迫切的需求，以及前沿科技可能带来的帮助。

在博物馆馆藏文物防震减灾领域，盖蒂博物馆积累了大约 25 年的丰富经验，并与盖蒂保护研究所一道，长期关注震害防护问题，不断创新并积极寻求更加有效的防震减灾手段。

充分认识博物馆文物和其他藏品防震减灾工作的重要性是开展这项工作的前提。历史经验多次证明：人们往往在经历大震大灾后才发现倾心保护藏品的艺术真谛。徜徉于博物馆中，公众希望从漫漫历史长河和艺术珍品的时空交汇中寻找慰藉、美感与和谐。我们从事这项工作的人员有责任让这些艺术珍品完好如初地呈现于世人面前。

研讨会取得了很好的效果，呈现在大家面前的这本论文集也达到国际水准。非常荣幸和来自希腊、日本、土耳其和印度等国，以及来自旧金山和洛杉矶的同行们交流分享。在此我郑重向读者推荐这本书。

两天的会议紧凑有序、清新向上并使人受益匪浅。面临地震灾害防护和保护馆藏文物的重要使命，本书收录的论文向读者展现出业内人士特有的操守、专业与创意。我有理由相信这次研讨会中大家所结成的友谊必将增进彼此的理解、合作和交流。在此和诸位共勉，在我们的共同努力下必将迎来馆藏文物防震减灾的春天。

Michael Brand
盖蒂博物馆 馆长

挑 战

Jerry Podany¹

对本书的读者来说,思考下面的等式会很有帮助:“可接受风险”=“可接受损害”。这个等式的左端是希望博物馆藏品是可以接近的并且通过这种接近来发挥它们的作用意义——这是博物馆使命的一部分;等式右端是我们所期望的能够保障馆藏文物长久保存并得以传承——这是一些博物馆也在做或者说至少应该做的工作。然而,我们能降低“可接受损害”有一个合理的最小值,我们只能尽最大努力使它降低,并力求保持等式左端和右端达到一种平衡。毕竟,我们没有人愿意去界定馆藏文物什么级别的损害是可接受的。这份坚持和承诺孕育出了一种职业和产业:馆藏文物的保护和管理。尽管世界各地对此重视程度各异,但馆藏文物保护工作的开展已使大家认识到了藏品保护的基本威胁,并且光照、湿度、温度、污染和虫蛀目前被广泛认为是导致馆藏文物损毁的主要因素。这个认识引发了博物馆环境保护定义的很多积极改进,也促进了馆藏文物保护“适宜性”实践和相关领域的研究。

大自然不断释放更大的威胁,用灾难性的几分钟甚至几秒钟摧毁所有馆藏文物、建筑和村落。面对洪水、泥石流、火灾和地震等巨大能量,我们不知所措。对这些事件预测能力的缺乏,使我们丧失了保证物质遗产安全的信心。然而事实上,我们对预防这些灾害有自己的处理方法,也有足够的技术来减轻它们带来的毁灭性灾难。但为什么这些有效的防灾减灾措施没有更多地被采纳应用,最主要原因或许是许多博物馆和文保工作人员还没有意识到这些技术可以减轻巨大的自然灾害。他们也缺乏对地震工程的精通,以至于无法科学解释和使用这些防灾减灾技术。我们一再地听到,“如果地震如此之大——无论如何,一切都会消失的,一个人能做什么?”或是“上一次地震中所有东西都没事,我确信下一次也不会有事。”这些态度仅一叶障目地看到了防灾减灾措施的花费不菲,以及预防性保护基金的匮乏。当然,和常规预防性保护预算和多数小博物馆的总预算比起来,一些减隔震技术确实昂贵,但其实还是有许多既简单有效又花费不多的防震方法的,比如将物体固定(粘、卡、绑等)只需用到很少的支出就可完成,再比如将大型、重型文物从顶层移动到底层,降低柜架的重心,花费的只有时间、一点点努力和防震概念,其中防震概念

¹ Jerry Podany:坐落于盖蒂别墅的盖蒂博物馆的高级文物保护研究员。

是最重要的。

馆藏文物适宜的防震方法和应用案例研究是这本书的主题,也是本次会议的焦点。2006年5月3日、4日在盖蒂博物馆召开的“馆藏文物防震保护”学术研讨会,值得纪念和庆祝。首先,正如盖蒂博物馆馆长 Michael Brand 在前言中所说,旧金山大地震百年纪念在2006年举行,这个百年纪念活动提醒我们认识到地震能带来的灾难性破坏。然而,2006年也是一个庆祝的年份,位于马里布的盖蒂别墅刚翻修后的盖蒂博物馆开馆,并且提供了一个把世界馆藏文物防震专家聚在一起讨论防震措施的机会,这毕竟是盖蒂博物馆文物防震研究工作开始并已持续超过20年的地方。有趣的是,盖蒂博物馆也早在1984年就举办过馆藏文物防震的会议,会上 Robert Rutherford 作了题为“非结构构件防震减灾应用指南”的馆藏文物防震保护研究报告。本次会议是一个渴望已久的梦想的实现,会议中再一次汇集了致力于馆藏文物防震保护研究这一被多年忽视话题的诸位专家。这次会议引起了新合作关系和长期交往合作的开始,也推动了世界范围内防震技术在博物馆中的应用和发展。至今,我们还不能阻止地震发生,但可以继续加强对地震特征和形成原因的了解。或许未来某一天我们具备了准确预测地震出现时间和震源中心的能力,毫无疑问,这种能力需要比现在付出更多的努力去开展复杂的数据和地理分析。而现在,地震的突发性和我们特定预测能力的匮乏导致地震不同于其他自然灾害,其他自然灾害最起码有明显的前兆。从经验、历史记录和日常报道中我们知道,地球上部分地区比其他区域更容易受到地震的侵扰;而地震从来就不是一个不可能的问题,而是一个什么时候的问题。那些在地震频发区工作和生活的人们(占地球总人口的大部分)需要更简单的预测——地震肯定会出现。在知道地震会出现后还不结合专业知识开展馆藏文物防震工作,这似乎是不理智的,甚至是不负责任的。尽管我们经常鼓励去深入研究防震新技术,但是也不必等到研究彻底完成,因为现在就已有减少地震破坏性影响的措施。尽管有些措施和方法价格昂贵而且很复杂,但也有很多其他被证实是有效(非常简单、直接和经济)的方法。

这本书中涉及各种各样的防震措施,从简单经济的到复杂昂贵的。作者分析了应用到大型藏品、小型博物馆、藏品陈列柜以及单个文物或历史建筑上的防震技术。这些方法从固定保护措施到用基础隔离机械装置来减缓藏品受地震的作用。所有的方法都是用自己的方式在不断创新过程中取得的开创性的成果,而所有的成果都在重大的挑战中不断被发展,因为(正如任何一个从事这项工作的工程师、保护专家或是装置制作者都会证实的)在地震中,一个小型雕塑通常比一栋多层建筑要难保护得多。

本书没有涉及震后响应和地震二次效应的论述,如火灾、水灾或山体滑坡。虽然抵御这些威胁和针对这些致命响应的预防工作以及应对它们发生后所要做

复措施都会有进一步的发展,但是它们已经在有关保存/保护文献中有了表述。文献中缺乏的并且是这本书想起到的作用,是让大家关注藏品以及博物馆的使命。到现在为止大部分防震研究都应用在了建筑上,这是在抗震保护领域急需的一个焦点。但是没有人会否认保护博物馆的重要性,特别是由于这样的努力既保护了藏品安全也保存了历史建筑。的确,在 O. P. Agrawal 的报告中,他注意到了如果建筑物坍塌,里面的藏品肯定会被损坏甚至可能是无法修复的。在博物馆遭到破坏的时候,次生灾害通常发生于灾难发生时匆忙疏散藏品的过程,有时候是文物的包装遭到破坏而引起的。一些作者指出了建筑稳定性的重要性,不论它是一座历史建筑和还是一个专门建造的博物馆建筑。Donna Strahan 就一座博物馆建筑的整体隔震作了一个报告,这种措施实现了馆舍、人员生命以及馆藏文物的安全。Charles A. Kircher 和 Alex G. Tarics 提供了建筑隔震有效性的一个总体回顾,而 William S. Ginell 展示了几个关于高脆弱性历史土坯建筑的保护研究案例。这些领域的发展对通过基础隔震来保护单个对象和藏品有直接的促进作用。

任何保护馆藏文物免受伤害的努力都要从以下几个方面开始:对产生伤害威胁的原动力的理解,对这些威胁可能对馆藏文物的作用的理解,对这些作用可能被缓解甚至消除的方法的理解。防震措施从接受每一个事件发生的可能性级别开始,然后就是理解它们的性质和引起的二次效应。Paul G. Somerville 和 Robert W. Graves 以及 Constantine Spyrakos、Ioannis Koutromanos、Charilos Maniatakis 在他们的贡献中贯彻了这些理解;一篇文章用了纯粹的地震学方法,而其他文章则是描述藏品典型地震响应的特征。我们应当应用这些信息以及确保这些信息定期地核查和升级,这些做法的好处在 Matthew J. Schoettler 和 Andreas Stavridis 核实应用在盖蒂博物馆基础隔震的有效性和局限性工作中被明确地展示了出来。

我们要牢记:尽管地震作用能量非常大,但馆藏文物很少被地震作用直接破坏,破坏更多的是由地震引发的物体动态运动的结果。摇摆、倾覆、颠簸和碰撞是最为常见的地震响应情形,它们引起的破坏也是最严重的。将这些作用降低,并缓解次生灾害,才能有效保护这些脆弱的馆藏文物。

为馆藏文物提供合适的支架是处在地震活跃地带中博物馆能采取的最重要的预防措施。一个精心设计的防震支架要发挥作用并不一定需要很大,也不一定很复杂或是很昂贵。在 Nancy Mendez、Karen Hildebrand 以及 Robert Sieger 的研究工作中很好地证实了这一点,他们展示了让人印象深刻的在小型历史建筑博物馆上使用的有效防震措施实例。所有作者都多次提到,防震约束措施和支架都必须根据场馆和馆藏文物的具体信息来设计、制作和固定,这些信息包括建筑、展出设备以及馆藏文物的材料特性、固定条件、动力特性等。对固定和约束文物的材料特性的正确理解也很有必要。Anne Crowley 和 Debra F. Laefer 提供了一份关于蜡的强度和合理使用的全面研究,蜡是一种常用来固定博物馆展品的材料。他们

的成果是一份现在急需的研究资料,它将为低价方案的有效使用作出贡献。

考虑到基本物理定律和大量常识也是工作中的重要工具,McKenzie Lowry 和他的同事们提供了一份应用案例概述,文中从简单的绑线束缚限制到复杂的、优化改进的基础隔震装置都一一作了介绍。尽管措施越复杂越昂贵,但是,在不对文物使用过分直接干预或是又大又难看的支架情况下,基础隔震装置可以是一种保护脆弱和不稳定文物的最有效措施。建筑物基础隔震的概念已经存在很长一段时间了,在现代,最早的实例是由 Jules Touaillon 于 1870 年获得的“双凹滚珠支承隔离器”专利。尽管材料改变了,不同的设计也被提了出来,但是基本原理却完全保持一致,并且在过去的几十年基础隔震开始被应用到一系列馆藏文物和历史建筑中。来自日本的 Kimio Kawaguchi 和来自土耳其的 Mustafa Eridik,来自美国的 John W. Hirx、McKenzie Lowry 和他们的同事,以及来自希腊的 Vlasis Koumousis 都论述了各种各样的基础隔震设计和应用。其中 Vlasis Koumousis 对先进的馆藏文物隔震分析全面彻底而令人印象深刻。

本书中报道的工作描述了馆藏文物在面对地震作用的挑战时,文物保护专家的不断成熟以及保护者、支架制作者、防震工程师和地震学专家间有效合作的增加。这对于我们所有人来说都是好消息。这样的合作在 Nicholas Dorman 在西雅图艺术博物馆的工作中令人印象深刻的说明。坏消息(无处不在的平衡提醒着我们)是地震在地球上永远存在,从远古开始它们就伴随着我们了。希腊地理学家和作家 Strabo 描述了许多在公元前五世纪和前四世纪的地震的影响。尽管当你开始去查看地质记录的时候这些事件看上去相对现代,然而我们可以确定更大的破坏将会来临,而我们则必须采取措施来保护我们无价的物质遗产。再次回到好消息,很明显对这个不可避免的威胁我们可以准备并减缓它的影响。新一代人已经注意到了这些挑战的重要性并带来了一些非常具有创造性的解决方案;这样的解决方案在 Victoria McGuinness 的报告中有非常好的展示。

文物防震这项工作取得成功的关键在于得到了博物馆馆长、馆内职员以及博物馆设计者的支持。尤其是在展品外借时间很短的博物馆短期展览中,上述支持特别的重要。Brian Considine 和 Ziyad Durón 充分描述了这个独特的挑战。如果没有上述支持,减小地震引发破坏这一复杂挑战可能很快就会变成一系列无法逾越的障碍——比面对威胁更糟糕的是忽视威胁。工程师和地震学家的持续兴趣也很关键,这也是他们面对不相关工程标准和交叉技术领域不平常需求的意愿。

我要对 Michael Brand 馆长对本次会议和这本书的支持表示感谢。让公众更容易接近博物馆藏品是任何一个博物馆所要追求的使命,但是这也伴随着需要承担保证这些文物安全的责任,而意识到这一点是需要很多远见卓识的。这些支持将极大地鼓励我们去面对那些所谓不可预见的、没有被完全理解的、经常不可阻挡的威胁。

我还要对盖蒂博物馆的众多同仁表达格外的谢意,他们对这个项目作出了义无反顾的奉献,并分享着跨越技术领域带来的寻找新方法的激动。我们从一个等式开始:“可接受风险”=“可接受损害”。如果这个等式一直成立,那么随着我们降低了风险,也将减小损害。

地震学的新发展:洛杉矶地区的地表运动环境

Paul G. Somerville¹ Robert W. Graves²

0. 引言

洛杉矶地区的地震环境非常复杂,除了圣安德烈亚斯断层和大致与它完全平行的走滑断层体系,还有一个产生于横断山脉的逆冲断层体系。这些逆冲断层包括与地表相交的断层和不与地表相交的隐蔽冲断层。最近出现的在不破坏地表层隐蔽冲断层上的地震实例包括 1983 年的科林加地震,1987 年的惠蒂尔海峡地震和 1994 年的北岭地震。美国地质勘探局国家地震灾害图显示,从应用在建筑规范上的年度概率来看,洛杉矶地区可能出现的地震灾害可能性为震级(M_w) 7.0 左右,最近距离 10km(6.2mi)。在几秒钟的时间里,更大更远的地震所产生的明显作用会从圣安德烈亚斯断层传播而来。

隐蔽冲断层不包括在加利福尼亚地图地质局 1998 年绘制的断层地图中,但是如果考虑这些断层,那在洛杉矶区域内只有非常少的地点距离活跃断层的地面痕迹或垂直表面轨迹投影超过 10km。因此,洛杉矶区域的地表运动环境主要是由中等规模的地震近断层条件决定的。

1. 近断层地表运动的空间变异

在提出由许多剧烈地震运动记录派生出的地震断裂模型的过程中,我们积累了大量经验。这些地震表明,在围绕断层的地表运动记录中观测到大型空间变异,特别是那些周期在 1s 左右或是更长周期的变异。这些变异通常被认为是震源的特征,比如断层面的方向、断层的类型(平移或倾向滑动)以及断层面滑移的演变和分布。例如,断裂方向性效应可以通过地震模型快速地解释(从地表运动所产生的强烈冲击现象中可以观测到破坏主要发生在断裂扩张的地方而不是那些不扩张的地方)。这些模型能够重演地震中记录周期为 1s 或周期更长的地表运动波形,这对高层建筑有着重要的影响。

1 Paul G. Somerville: 加利福尼亚州帕萨迪纳 URS 公司的首席地震学家。

2 Robert W. Graves: 加利福尼亚州帕萨迪纳 URS 公司的首席地震学家。

在过去的 10 年里,对地表运动衰减模型能够描述断层周围由于震源效应而产生的地表运动空间变异已经有了尝试。将这些影响整合在地表运动模型里的目的是为了增加模型预测的准确性并减少由于中等平均地表运动所引起的变化。在地表运动中的这种变化对用于抗震设计的地表运动预测有很大影响。研究表明,无论设计地表运动是基于中位数加标准差的概率方法,还是整合地表运动变化的概率方法,这一结论都是正确的。第一个可预测断层周围地表运动空间变异的模型包括一个断裂方向性效应模型(Somerville et al., 1997)和一个包含倾滑断层下盘和上盘间的地表运动区别的模型(Abrahamson and Somerville, 1996; Abrahamson and Silva, 1997)。这些初步的模型是根据记录的强运动数据获得的,进而根据这些现象获得的概念模型形成地表运动模型。

到目前为止,这些模型还没有系统地应用到美国地质勘探局地震灾害地图中,因此,该地图(《国际建筑规范》(IBC)中的最大容许地震(MCE)设计地表运动图是基于此地图)中并不包括在这些影响下地表震级的空间变异。并且,它还尝试着分别以 1.5g 和 0.6g 对应周期 0.2s 和 1.0s,来缩短 B 面(岩体较软的位置)年度出现概率为 1/2500 的不确定地表运动,除非对最大地震平均地面运动加速 1.5 倍,这样才能缓和这些影响造成的空间变异作用。

2. 近断层断裂方向性脉冲

近断层地表运动不同于普通地表运动的地方在于它们经常包含剧烈的相干动态长周期脉冲和永久的地面位移。这些动力运动取决于出现在垂直于断层走向的水平部分中的显著长周期脉冲,而这些运动是由断裂的方向性效应造成的(Somerville, 2003)。从近期地震的近断层记录中看到此类脉冲是窄频带脉冲,周期随地震强度的增加而增加(Somerville, 2003)。图 1(a)和(b)的数据中,将震级为 6.7~7.0 的断裂方向性脉冲和震级为 7.2~7.5 的数值进行了比较。这些脉冲的窄频带性质造成它们的弹性反应谱具有了峰值行为。图 1(b)中,正断层部分的反应谱(包括方向性脉冲)由红实线表示,平行断层部分(与预期结果相同,在长周期内较小)的反应谱由蓝色长虚线表示。1994 年《统一建筑规范》(UBC)中并不采用场地条件下的波谱作为比较的参考模型(International Conference of Building Officials, 1997)。大震下(图 1(b)右列)的正断层谱和 1994 年《统一建筑规范》的频谱在 0.5~2.5s 这一中级周期范围内是基本一致的,但是在 4s 的时候有一个突起,在这个位置正断层波谱超过了 1994 年的《统一建筑规范》波谱。与大震截然不同,中小震下(图 1(b)左列)的正断层波谱与大震有较大区别,它们在 0.2~2.5s 周期范围内波谱远远大于 1994 年《统一建筑规范》中的值,但是在更长的周期范围里和统一建筑规范相似。伴随着震级增加,脉冲周期增加。脉冲周期与震级的相关性