



国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下空间抗震与安全

袁勇 陈之毅 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

国家“十二五”重点图书出版规划项目

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下空间抗震与安全

袁勇 陈之毅 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

上海市高校服务国家重大战略出版工程入选项目

图书在版编目(CIP)数据

城市地下空间抗震与安全/袁勇,陈之毅编著.—上海:同济大学出版社,2014.12

(城市地下空间出版工程·防灾与安全系列)

ISBN 978-7-5608-5642-1

I. ①城… II. ①袁…②陈… III. ①城市空间—地下建筑物—抗震结构—研究 IV. ①TU96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 221749 号

城市地下空间出版工程·防灾与安全系列

城市地下空间抗震与安全

袁勇 陈之毅 编著

策 划: 杨宁霞 季 慧

责任编辑: 季 慧

责任校对: 徐春莲

装帧设计: 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店、建筑书店、网络书店

制 作 南京前锦排版服务有限公司

印 刷 上海中华商务联合印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.25

字 数 256000

版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-5642-1

定 价 68.00 元



版权所有 侵权必究 印装问题 负责调换

内容提要

本书为国家“十二五”重点图书出版规划项目、国家出版基金资助项目、上海市高校服务国家重大战略出版工程入选项目。

本书结合了著者近年来在地下大空间结构抗震领域的研究成果,较全面、系统地介绍了地下结构历史震害案例,分析归纳了震害特征与破坏机制,详细介绍了大规模地下空间结构高性能数值仿真技术、城市地下空间结构性能化抗震设计及大跨度地下空间结构的减震控制与安全技术的相关研究成果。全书依托具体工程实例,对地下空间结构的抗震设计、数值分析和减震技术方面的诸多理论与技术问题进行了剖析,对科学研究和实际工程都具有参考价值。

本书可供从事地下结构设计、施工、建设管理以及防灾减灾工程的科技人员使用,也可作为高等院校隧道与地下工程专业师生的参考用书。

《城市地下空间出版工程·防灾与安全系列》编委会

学术顾问

叶可明 中国工程院院士
孙 钧 中国科学院院士
郑颖人 中国工程院院士
顾金才 中国工程院院士
蔡美峰 中国工程院院士

主任

钱七虎

副主任

朱合华 黄宏伟

编委(以姓氏笔画为序)

王怀忠 王明洋 叶永峰 闫治国 刘曙光 宋春明
陈 峰 陈之毅 胡群芳 钟桂辉 袁 勇 顾雷雨
赫 磊 蔡 浩 戴慎志

作者简介

袁 勇 工学博士,同济大学隧道及地下工程研究所所长、中奥隧道与地下工程研究中心主任,教授、博士生导师,国际结构混凝土学会(FIB)性能与安全分会委员、中国土木工程学会防护工程分会理事和计算机工程应用分会委员、中国岩石力学与工程学会掘进机应用分会委员、中国建筑学会结构计算理论与应用专业委员会秘书长,国际学术期刊 *Engineering Structure* 和 *Structural Concrete* 编委,国内学术期刊《力学与实践》、《商品混凝土》编委。长期从事地下工程结构理论与应用的教学与科研工作,先后主持国家自然科学基金重点项目、国家科技支撑计划、上海市科技攻关与国际合作课题 10 余项,发表学术论文逾百篇,科研成果获上海市和教育部科技进步奖一等奖 4 项,获国家教委“优秀青年教师(霍英东)奖”、“上海市青年科技启明星”、“上海市优秀青年教师”等荣誉,1997 年获上海市政府特殊津贴。

陈之毅 工学博士,同济大学地下建筑与工程系副教授、博士生导师,上海市浦江人才,国际土力学与岩土工程学会(ISSMGE)会员,国家自然科学基金和浙江省自然科学基金委同行评议专家,*Structure and Infrastructure Engineering* 等国际学术期刊的论文审稿人。主要研究方向为隧道与地下工程抗震分析、地下结构性能化设计、减震耗能控制技术等,近年来主持和参与国家、省部级科研项目 10 余项,部分科研成果被纳入国家标准《建筑抗震设计规范》、上海市工程建设规范《上海市地下铁道建筑结构抗震设计规范》中。在国内外发表论文 50 余篇,其中 SCI、EI、ISTP 收录 40 余篇;已申请并获得受理国家发明专利 5 项。

■ 总 序 ■

FOREWORD

国际隧道与地下空间协会指出,21世纪是人类走向地下空间的世纪。科学技术的飞速发展,城市居住人口迅猛增长,随之而来的城市中心可利用土地资源有限、能源紧缺、环境污染、交通拥堵等诸多影响城市可持续发展的问题,都使我国城市未来的发展趋向于对城市地下空间的开发利用。地下空间的开发利用是城市发展到一定阶段的产物,国外开发地下空间起步较早,自1863年伦敦地铁开通到现在已有150年。中国的城市地下空间开发利用源于20世纪50年代的人防工程,目前已步入快速发展阶段。当前,我国正处在城市化发展时期,城市的加速发展迫使人们对城市地下空间的开发利用步伐加快。无疑21世纪将是我国城市向纵深方向发展的时代,今后20年乃至更长的时间,将是中国城市地下空间开发建设和利用的高峰期。

地下空间是城市十分巨大而丰富的空间资源。它包含土地多重化利用的城市各种地下商业、停车库、地下仓储物流及人防工程,包含能大力缓解城市交通拥挤和减少环境污染的城市地下轨道交通和城市地下快速路隧道,包含作为城市生命线的各类管线和市政隧道,如城市防洪的地下水道、供水及电缆隧道等地下建筑空间。可以看到,城市地下空间的开发利用对城市紧缺土地的多重利用、有效改善地面交通、节约能源及改善环境污染起着重要作用。通过对地下空间的开发利用,人类能够享受到更多的蓝天白云、清新的空气和明媚的阳光,逐渐达到人与自然的和谐。

尽管地下空间具有恒温性、恒湿性、隐蔽性、隔热性等特点,但相对于地上空间,地下空间的开发和利用一般周期比较长、建设成本比较高、建成后其改造或改建的可能性比较小,因此对地下空间的开发利用在多方论证、谨慎决策的同时,必须要有完整的技术理论体系给予支持。同时,由于地下空间是修建在土体或岩石中的地下构筑物,具有隐蔽性特点,与地面联络通道有限,且其周围临近很多具有敏感性的各类建(构)筑物(如地铁、房屋、道路、管线等)。这些特点使得地下空间在开发和利用中,在缺乏充分的地质勘察、不当的设计和施工条件下,所引起的重大灾害事故时有发生。近年来,国内外在地下空间建设中的灾害事故(2004年新加坡地铁施工事故、2009年德国科隆地铁塌方、2003年上海地铁4号线事故、2008年杭州地铁建设事故等),以及运营中的火灾(2003年韩国大邱地铁火灾、2006年美国芝加哥地铁事故等)、断电(2011年上海地铁10号线追尾事故等)等造成的影响至今仍给社会带来极大的负面

效应。因此,在开发利用地下空间的过程中需要有深入的专业理论和技术方法来指导。在我国城市地下空间开发建设步入“快车道”的背景下,目前市场上的书籍还远远不能满足现阶段这方面的迫切需要,系统的、具有引领性的技术类丛书更感匮乏。

目前,城市地下空间开发亟待建立科学的风险控制体系和有针对性的监管办法,《城市地下空间出版工程》这套丛书着眼于国家未来的发展方向,按照城市地下空间资源安全开发利用与维护管理的全过程进行规划,借鉴国际、国内城市地下空间开发的研究成果并结合实际案例,以城市地下交通、地下市政公用、地下公共服务、地下防空防灾、地下仓储物流、地下工业生产、地下能源环保、地下文物保护等设施为对象,分别从地下空间开发利用的管理法规与投融资、资源评估与开发利用规划、城市地下空间设计、城市地下空间施工和城市地下空间的安全防灾与运营管理等多个方面进行组织策划,这些内容分而有深度、合而成系统,涵盖了目前地下空间开发利用的全套知识体系,其中不乏反映发达国家在这一领域的科研及工程应用成果,涉及国家相关法律法规的解读,设计施工理论和方法,灾害风险评估与预警以及智能化、综合信息等,以期成为对我国未来开发利用地下空间较为完整的理论指导体系。综上所述,丛书具有学术上、技术上的前瞻性和重大的工程实践意义。

本套丛书被列为“十二五”时期国家重点图书出版规划项目。丛书的理论研究成果来自国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)、“十一五”国家科技支撑计划、“十二五”国家科技支撑计划、国家自然科学基金项目、上海市科委科技攻关项目、上海市科委科技创新行动计划等科研项目。同时,丛书的出版得到了国家出版基金的支持。

由于地下空间开发利用在我国的许多城市已经开始,而开发建设中的新情况、新问题也在不断出现,本丛书难以在有限时间内涵盖所有新情况与新问题,书中疏漏、不当之处难免,恳请广大读者不吝指正。

刘七虎

2014年6月

■ 前 言 ■

随着城市地下空间的开发与利用,特别是随着设计方法和施工技术的提高,现代地下空间结构以大型地下公共建筑和综合交通枢纽为代表不断向着大跨度、大断面、复杂结构形式方向发展。一大批在国际上具有重大影响的大型地下空间结构已经建成或正在建设中,以上海为例,最具代表性的是世博轴地下综合体工程和虹桥综合交通枢纽工程。地下空间结构尺度大幅度增长带来的主要问题是结构抗侧向力刚度的急剧下降,复杂结构体系又使得结构的薄弱环节不易被察觉,这就使得地震作用在地下结构设计中越来越受到重视。原有的常规地下结构的建设和设计经验已不能满足现阶段工程建设的需要,相关理论与技术水平有待进一步提高。在此背景下,我们近年来针对大型地下空间结构的抗震与安全问题开展了相关研究。本书内容主要取材于“十一五”国家科技支撑计划重点项目“城市地下空间建设关键技术研究”与工程示范”课题四——“城市地下空间防灾减灾技术研究”(编号:2006BAJ27B04)的相关成果,同时结合了近年来针对上海世博轴及地下综合体工程、徐家汇枢纽站港汇广场改造工程等多项重点工程专题研究的成果,在地下结构历史震害特征与破坏机制、大规模地下空间结构高性能数值仿真技术、城市地下空间结构性能化抗震设计及大跨度地下空间结构的减震控制与安全技术等方面作了全面、详细的介绍,希望能供国内同行参考。

感谢北京工业大学、上海市城市建设设计研究院、北京市勘察设计研究院、中国建筑科学研究院、上海市隧道工程轨道交通设计研究院、上海市政工程设计研究总院等单位对相关课题研究提供的协助,以及以上单位的相关技术及管理人员对研究工作的大力支持;同时,也要感谢参与相关课题研究的同济大学、北京工业大学等单位的研究者在模型试验、数值模拟、现场测试等方面所做的大量工作。

地下结构抗震涉及防灾工程、结构工程、地下工程、隧道工程、岩土工程、计算机应用技术、软件工程和高性能计算与超级计算机等多学科领域的交叉与融合,限于著者的认识及水平,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

袁 勇 陈之毅

2014年6月于同济大学

■ 目 录 ■

总序
前言

1	绪论	1
1.1	概述	2
1.2	城市地下空间建筑特点	3
2	地下工程结构的强震破坏	5
2.1	隧道结构的震害特征与破坏机制	6
2.1.1	隧道的震害特征	6
2.1.2	隧道的破坏机制	10
2.1.3	震后修复	12
2.2	地下框架结构的震害特点	12
2.2.1	框架结构的震害特征	12
2.2.2	框架结构的破坏机制	14
2.2.3	震后修复	15
3	大规模地下空间结构高性能数值仿真技术	17
3.1	高性能计算发展趋势分析	18
3.1.1	国家需求背景	18
3.1.2	高性能计算机应用现状	19
3.2	高性能数值仿真建模的若干关键问题	21
3.2.1	人工边界问题	21
3.2.2	斜入射问题	55
3.2.3	土与结构接触问题	73

3.3	高性能数值仿真建模技术	82
3.3.1	局部精细化建模技术	82
3.3.2	局部精细化与整体混合建模技术	88
3.4	本章小结	94
4	城市地下空间结构性能化抗震设计研究	95
4.1	引言	96
4.1.1	现行设计方法及存在的问题	96
4.1.2	性能化抗震设计理论的提出及特点	97
4.1.3	性能化设计研究现状	99
4.2	基于性能的抗震设计的目标性能	103
4.2.1	目标性能的确定	103
4.2.2	地下结构性能的评估指标体系	105
4.3	城市地下空间建筑结构性能评估方法	108
4.3.1	等代地震荷载法	109
4.3.2	反应位移法	111
4.3.3	土层-地下结构整体时程分析法	117
4.4	本章小结	118
5	大跨度地下空间结构的减震控制与安全技术	119
5.1	结构减震控制概论	120
5.1.1	结构减震控制的概念与减震机理	120
5.1.2	结构减震控制的内容与分类	121
5.1.3	结构减震控制的特点与优越性	123
5.2	现有地下结构减震技术研究现状	124
5.3	大跨度地下结构消能减震装置研究	125
5.3.1	结构消能减震概述	125
5.3.2	大跨度地下结构消能减震效果评估	126
5.4	本章小结	128
6	工程应用	129
6.1	工程应用背景及目标	130
6.2	上海世博轴及地下综合体工程罕遇地震作用下的三维弹塑性 时程分析	130

6.2.1	工程概况	130
6.2.2	三维弹塑性时程分析	132
6.3	上海轨道交通 9 号线徐家汇枢纽站改造工程的抗震性能评估	132
6.3.1	工程概况	132
6.3.2	A 区结构(沉降缝东侧)改造前后抗震性能评估	134
6.3.3	B 区结构(沉降缝西侧)改造前后抗震性能评估	136
6.3.4	C 区结构改造前后抗震性能评估	139
参考文献		141
索引		146



1 绪论

1.1 概述

自 1906 年旧金山大地震以来,对地面建筑结构的抗震研究已有 100 多年的历史。然而,与地面上部结构相比,地下空间结构的抗震研究近 20 年来才开始逐步引起人们的重视。

地下空间结构包围在地层介质中,地震发生时地下结构随地层一起运动,与地面结构约束情况不同,地层介质的嵌固改变了地下结构的动力特征(如自振频率)。人们一般认为,地震对于地下空间结构的影响很小,同时由于以前城市地下空间开发利用相对较少,地下空间结构在规模和数量上相对于地面结构都比较少,受到地震灾害,特别是中震、大震考验的机会也相对较少,加之地下结构的震害相对地面结构也比较轻,因此,人们长期以来都认为地下空间结构具有良好的抗震性能。然而,1995 年日本阪神地震中,以地铁车站、区间隧道为代表的大型地下空间结构首次遭受严重破坏(Iida et al., 1996),充分暴露出地下空间结构抗震设防的弱点。随着城市地下空间开发利用和地下结构建设规模的不断加大,地下空间结构的抗震设计及其安全性评价的重要性、迫切性愈来愈明显。

特别需要指出的是,我国大部分地区为地震设防区。根据地震烈度分布资料,在全国 300 多个城市中,有一半地区位于地震基本烈度为 7 度或 7 度以上的地震区,23 个百万以上人口的特大城市中,有 70% 属 7 度和 7 度以上的地区,像北京、天津、西安等大城市都位于 8 度的高烈度地震区。我国地下空间开发利用的潜力巨大,因此在人防工程、地下结构的设计及建设中贯穿抗震减灾思想显得极其重要。

国外早年进行的地下工程结构抗震研究中,美国修建旧金山海湾地区的快速运输隧道(简称 BART 线)时制定的抗震设计标准具有开创性意义(Kuesel, 1969)。日本从实验和理论等方面对沉埋隧道和地下铁道的抗震设计进行过探讨,取得了较多成果;苏联对塔什干等城市的地下铁道的计算、结构形式和构造措施也进行过研究。1995 年日本阪神地震后,许多国家加大了对地下空间结构抗震设计的研究投入。日本于 1999 年对铁道构筑物等重新制定了抗震设计规范,大阪市则对高速电气轨道 8 号线地下构筑物的设计制定了抗震设计标准及指南,以改进隧道和地铁的抗震设计。

我国地下工程结构的抗震研究工作有不少先导性的研究。夏明耀(1984)介绍了地下结构的抗震设计计算方法,但仍沿用静力法的基本思路。林皋(1990)则系统给出了两种地下结构抗震分析的方法:波动解法和相互作用解法(结构动力学法)。蒋通等(1999)从地基震陷及接缝变形角度,在假想的 3 种概率水准的地震波条件下,对区间隧道的抗震性能进行研究。周健(2004)对地震输入和软土动力参数进行了假设,并在此基础上采用有效应力动力方法对隧道的抗震稳定性进行了研究。

我国地下工程结构的抗震设计的工程应用上,铁路工程主要采用地震系数法,核电厂主要采用反应位移法(也提及动力有限元法)。《地下铁道设计规范》(GB 50157—92)对抗震设计并无具体规定。纵观国内外地下结构抗震研究的文献资料可以发现:

(1) 各种抗震分析方法都存在不同程度的不足。

(2) 目前,强震观测所取得的地震动资料仍主要限于地表面,对地下深部所取得的资料十分有限,而地下结构的震害主要取决于地震波传播所引起围岩变形的大小,这是地震动观测中的薄弱环节。

(3) 现有的研究主要集中在一维线性地下空间结构(地铁、隧道),而大断面、大跨度地下空间结构抗震研究的工作开展得极少。

(4) 缺乏明确的地下空间结构抗震设计规范。

(5) 缺乏对地下空间结构破坏后的修复加固工作的研究。

地震工程研究的一个主要特点是结构抗震的研究水平随着地震的发生而逐步提高。每一次大的地震发生,都会给结构的抗震研究提出新课题,从而成为研究的主要方向,推动结构抗震研究的发展提高。1995年日本阪神地震便使工程界认识到必须重新具体评价地下结构抗震的安全性,所谓“前车之鉴,后事之师”,应该认真总结,汲取以往的经验教训,做好防震减灾措施,防患于未然。

总之,大地震不断提醒人们,地下空间结构在地震作用下并不是绝对安全的,在大力提倡城市地下空间开发利用的21世纪,重新具体评价地下空间结构抗震的安全性,加强研究地下空间结构的抗震性能,对地下空间结构抗震设计提出相应的建议和抗震措施,具有重要的理论意义和工程实用价值。

1.2 城市地下空间建筑特点

城市地下空间建筑有其自身的显著特征(孙钧等,1987):

(1) 整个结构均处于周围岩土介质的包围之中。

(2) 建筑尺度并非单向延伸。

(3) 结构受到周围土体竖直、水平两个方向压力作用。

地下空间结构的这些特征,使其地震响应特点也具有与传统地下结构地震响应相近的规律(郑永来等,2005):

(1) 地下结构的地震破坏程度一般比地上结构低。

(2) 深埋结构破坏程度一般比浅埋结构轻。

(3) 土中的地下结构比岩石中的结构更容易遭到破坏。

(4) 在地震强度和震中距均相同的条件下,地下结构的震害程度可能取决于峰值地面加速度和峰值地面速度的大小。

(5) 地震中强震持续时间是地下结构破坏程度的重要影响因素,其可能引起结构的疲劳破坏以及周围土介质的大变形。

(6) 对震中距很小的地下结构,地震波高频分量可能会有显著影响。



2 地下工程结构的强震破坏