

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

重大工程的动力灾变学术著作丛书

地铁地下结构抗震



庄海洋 陈国兴 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
重大工程的动力灾变学术著作丛书

地铁地下结构抗震

庄海洋 陈国兴 著

科

内 容 简 介

本书是国内第一部专门研究地铁地下结构抗震的学术专著,集作者近二十年在地铁地下结构抗震领域的理论分析、数值模拟、模型试验、震害对比及工程实践方面的研究成果于一体,较为系统地总结和阐述了作者在地铁地下结构地震反应的影响因素及规律、损伤破坏模拟模型和方法、破坏机理与失效模式、抗震设计理论与方法及工程应用等方面取得的系列创新性成果,并较完整地介绍了该领域的研究现状。该书构建了较为系统的地铁地下结构抗震设计理论与方法,内容严谨且完整,各章内容既有联系又相对独立,具有重要的学术价值和工程应用参考价值。

本书可作为从事城市地下工程防震减灾课题的研究人员和工程实践的专业技术人员的专业参考书,也可作为土建类相关专业的研究生教学用书。

图书在版编目(CIP)数据

地铁地下结构抗震/庄海洋,陈国兴著. —北京:科学出版社,2017.1

(重大工程的动力灾变学术著作丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-051550-6

I. ①地… II. ①庄… ②陈… III. ①地下铁道-地下工程-抗震设计
IV. ①TU92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 000750 号

责任编辑:刘宝莉 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年1月第一次印刷 印张:32

字数:625 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

2007年5月曾有幸为陈国兴教授的著作《岩土地震工程学》写过序,该书还对颇有新意的地铁地下结构抗震研究进展做了专门的介绍;还记得我还在该书的序中专门写了一句:希望他能抓住这个方向,再接再厉,精益求精,做出更好和更多的研究成果。今天,欣闻陈国兴教授与其学生庄海洋教授合著的《地铁地下结构抗震》即将由科学出版社出版,在地铁地下结构抗震防灾研究方面取得了系统性的创新成果,10年前的期待今已成真;不由得回忆起陈国兴教授30年前在中国地震局工程力学研究所的求学历程,毕业离开研究所至今也20年有余了,亲眼见证了陈国兴教授及其研究团队的成长过程,看到当年的学生带领研究团队取得了新的研究成果,又有“先睹为快”的机会,顺理成章的愿意向读者推荐此书,故再次欣然为序。

地下结构的地震震害可以追溯到1923年的日本关东大地震。1995年日本阪神地震、1999年中国台湾集集地震和1999年土耳其科贾埃利(Kocaeli)地震中均发生了地下结构的严重破坏现象。自21世纪初以来,我国城市轨道交通的建设规模之大和速度之快,举世瞩目;为此,地铁地下结构的地震安全问题引起了土木工程、交通工程、地震工程等领域研究人员与工程师的高度关注。陈国兴教授是我国较早开展地铁地下结构抗震研究的学者之一,2001~2006年指导其第一位博士生庄海洋完成了学位论文“土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究”,率先开展并完成了大比尺可液化地基中地铁地下结构振动台模型试验与数值模拟对比分析,发现了地下结构侧向地基土液化时结构构件会发生较大的不可恢复的残余变形,揭示了软弱地基和液化地基上地铁地下结构的破坏机理;且该论文入选2008年江苏省百篇优秀博士论文,其研究成果获得同行的高度认可。随后,陈国兴教授又有4位博士生完成该领域的学位论文研究,研发了地铁地下结构大型振动台模型试验的成套测试技术,首次实现了大型振动台破坏性地下结构模型试验,发展和完善了多个土体动力本构模型,研发了大型地下结构地震损伤演变的模拟技术及其高性能数值分析平台,系统地研究了地铁地下结构非线性地震反应特性及其分析方法,并针对这类结构建立了抗震性能评价方法。

《地铁地下结构抗震》是国内第一部专门研究地铁地下结构抗震的学术专著,是在陈国兴教授研究团队近20年的研究成果基础上撰写而成的。其成果已在我国相关的城市轨道交通工程中得到成功应用,有力地推进了城市轨道交通防震减灾工作的发展。该书内容丰富,对土与结构非线性动力相互作用涉及的土动力学

理论与方法既进行了深入的数值研究,又进行了模型试验的印证,内容完整,分析严谨。全书对地铁地下结构抗震研究领域中的重要课题均作了详尽的分析和讨论,例如,系统介绍了地下结构的震害特征、地下结构邻近土体的动力学特性、土与地下结构非线性动力相互作用分析的有限元法及振动台模型试验技术、多种结构形式地铁地下车站结构的抗震性能、地铁区间隧道地震反应特性、地铁地下结构抗震设计的简化分析方法。

这本专著的出版无疑对地铁地下工程具有重要的学术价值和工程应用参考价值。对推动地铁地下结构抗震课题的研究和工程实践工作大有裨益;也一定会成为相关专业的研究生和设计施工方面的专业人员钟爱的专业书籍。

谢礼志

中国地震局工程力学研究所名誉所长

中国工程院院士

2016年11月于哈尔滨

前 言

我国城市轨道交通的发展速度举世瞩目,城市地铁地下结构的地震安全问题引起了土木工程、地震工程等领域研究人员与工程师的高度关注。地铁地下结构抗震问题是涉及地震工程学、结构动力学、土动力学、岩土工程学和结构工程学等多学科交叉的科学问题。目前,对地铁地下结构的地震反应特性、地震损伤模拟方法、破坏机理与失效模式、抗震设计理论和方法及技术尚缺乏系统、完整的深入研究。我国大规模的城市轨道交通建设亟需地铁地下结构抗震设计理论、方法及技术指导。

庄海洋教授于 2001~2006 年期间在南京工业大学硕博连读,师从陈国兴教授;毕业留校工作后,仍在陈国兴教授学术团队从事土动力学、土与地下结构动力相互作用和地铁结构防震减灾方面的研究工作。近二十年来,陈国兴教授学术团队在地铁地下结构抗震领域开展了创新性的系统研究,考虑不同的地基条件、车站结构形式、模型结构材料、输入地震动特性和地震损伤程度,开展了系统性的地铁地下结构大型振动台系列模型试验研究,研发了基于虚拟仪器技术的 98 通道动态采集系统及数据批处理软件、新型传感技术、数据采集与处理平台,为解决模型试验数据采集量大、数据采集控制及测试分析系统复杂的问题提供了技术手段,提出了多介质模型结构体系的相似比设计方法。作为庄海洋博士学位论文的主要内容,于 2004 年首次开展并完成了 1:25 的大比尺可液化土-地铁地下结构振动台模型试验与数值模拟对比分析,解决了土箱的边界效应问题,发现地下结构侧向地基土液化时结构构件会发生较大的不可恢复的残余变形,该变形是液化地基上地下结构严重破坏的主要因素;选择易脆和低强度材料来制作结构是开展大型振动台地下结构破坏性模型试验的一个关键技术,结合地基土相似准则的确定和地下结构混凝土材料特性,开展了石膏的物性试验,于 2009 年首次实现了大型振动台破坏性地下结构模型试验。发展和完善了土体黏弹性、黏弹塑性和砂土液化大变形动力本构模型,基于 ABAQUS 软件,研发了大型地下结构地震灾变模拟技术与平行计算显式有限元法集成平台;根据上海、南京和苏州等城市的实际地铁建设情况,开展了地铁地下结构非线性地震反应特性及其分析方法的系统性研究。该专著的成果主要包括陈国兴教授指导的博士生庄海洋、左熹、龙慧、陈磊、陈苏的学位论文,庄海洋博士毕业后留校工作至今的相关研究工作,以及陈国兴、庄海洋教授指导其他研究生的相关工作。

本专著的相关研究内容先后得到国家自然科学基金重大研究计划“重大工程

的动力灾变”培育和集成项目、国家自然科学基金面上项目和青年基金项目、国家公益性行业(地震)科研专项、北京市属高等学校创新团队建设与教师职业发展计划项目、江苏省自然科学基金重点项目和面上项目、江苏省“六大人才高峰”资助计划、江苏省高校自然科学重大基础研究项目、中国和江苏省博士后科学基金项目等科研项目的资助。作者对国家自然科学基金委员会、江苏省科学技术厅和教育厅等相关部门的长期支持表示最诚挚的感谢!

在近 20 年的地铁地下结构抗震研究中,得到了北京工业大学杜修力教授学术团队的长期支持与协作,中国地震局地球物理研究所李小军研究员、中国地震局工程力学研究所王自法和景立平研究员、浙江工业大学蔡袁强教授、重庆大学刘汉龙教授、大连理工大学李宏男教授、解放军理工大学方秦和王明洋教授、广州大学崔杰教授、北京建筑大学戚承志教授也给予了大力支持;并得到了南京工业大学科学研究院、研究生院、交通运输工程学院的长期支持。研究生王瑞、薛栩超和胡中华协助完成了书稿整理的大量辅助工作。谨向所有曾给予作者支持和帮助而在此无法一一提及的朋友,以及曾参与研究工作的所有研究生,一并致以衷心的感谢。

作者虽长期从事岩土地震工程领域的科学研究与工程实践,但限于知识面的局限性,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评赐教。

庄海洋 陈国兴

2016 年 9 月于南京工业大学

目 录

序

前言

第 1 章 地下结构抗震概述	1
1.1 引言	1
1.2 地下结构震害特征	5
1.3 地下结构抗震研究方法 with 现状	8
1.3.1 地下结构动力模型试验方法	8
1.3.2 地下结构地震反应计算方法	18
1.4 本书内容安排	25
参考文献	28
第 2 章 地下结构邻近土体的动力学特性	36
2.1 引言	36
2.2 土体的动剪切模量与阻尼比	37
2.2.1 小应变动剪切模量	37
2.2.2 动剪切模量和阻尼比与剪应变幅的经验关系	39
2.3 土的动应力-应变关系特征及其物理模型	44
2.3.1 土的动应力-应变关系特征	44
2.3.2 土动力学特性的物理模型	47
2.4 土的常用黏弹性动力学本构模型	49
2.4.1 双曲线模型	49
2.4.2 修正 Davidenkov 模型	52
2.4.3 修正 Matasovic 模型	58
2.4.4 修正 Davidenkov 模型与 Matasovic 模型的比较	59
2.5 软土黏弹塑性动力学本构模型	61
2.5.1 黏塑性记忆型嵌套面本构模型的建立	62
2.5.2 黏塑性记忆型嵌套面本构模型的验证	67
2.6 饱和砂土液化大变形动力学本构模型	69
2.6.1 砂土液化大变形本构模型的建立	69
2.6.2 砂土液化大变形本构模型的验证	73
参考文献	76

第3章 土与地下结构非线性动力相互作用的有限元法	79
3.1 引言	79
3.2 土与地下结构动力相互作用的基本原理	79
3.3 混凝土非线性动力学损伤本构模型	82
3.3.1 混凝土动力损伤变量的概念	83
3.3.2 模型屈服函数与流动法则	84
3.3.3 混凝土动力损伤模型参数的确定	85
3.4 土与地下结构的动力接触	86
3.4.1 接触面的动力学行为特征	87
3.4.2 动力接触问题的数值算法	88
3.4.3 动力接触效应对地下结构地震反应的影响	89
3.5 相互作用体系的几何非线性	96
3.6 计算模型地基的人工边界	96
3.7 地震基岩面的地震动输入	102
3.7.1 基岩地震动输入	102
3.7.2 输入地震动的选取	103
3.7.3 代表性的地震记录简介	104
3.8 非线性动力相互作用平衡方程的求解	108
3.8.1 基于隐式算法的动力平衡方程积分法	108
3.8.2 基于显式算法的动力平衡方程积分法	110
3.8.3 动力相互作用体系两种算法的对比	111
参考文献	117
第4章 土-地下结构体系振动台试验方法与技术	120
4.1 引言	120
4.2 多介质耦合模型试验体系相似比设计	121
4.2.1 相似比量纲分析方法	121
4.2.2 土-地下结构相互作用体系相似比设计原则	122
4.3 振动台模型土箱的研制与测试	123
4.3.1 刚性模型土箱的研制与试验验证	123
4.3.2 叠置柔性土箱的研制与试验验证	128
4.4 模型地基和模型结构制作技术	136
4.4.1 模型地基制作技术	136
4.4.2 模型结构制作技术	137
4.5 模型试验动力测试技术	139
4.5.1 动态信号采集系统的研制	139

4.5.2 非接触性静、动态位移测试技术	142
4.5.3 光纤 Bragg 光栅应变测试技术	153
参考文献	157
第5章 两层三跨框架式地铁地下车站结构抗震研究	159
5.1 引言	159
5.2 软土场地两层三跨地铁地下车站结构振动台模型试验	160
5.2.1 模型试验概况	160
5.2.2 模型试验结果与分析	164
5.3 软土场地两层三跨框架式地铁地下车站结构地震反应数值模拟	167
5.3.1 地下车站结构的地震反应特征	167
5.3.2 软弱层埋深对地下车站结构地震反应的影响	177
5.3.3 软弱层厚度对地下车站结构地震反应的影响	185
5.4 可液化场地两层三跨框架式地铁地下车站结构振动台模型试验	192
5.4.1 模型试验概况	192
5.4.2 模型试验结果与分析	195
5.5 可液化场地两层三跨框架式地下车站结构地震反应数值模拟	210
5.5.1 计算模型	210
5.5.2 车站结构周围地基的液化特性	210
5.5.3 液化场地车站结构的上浮行为及其影响	212
5.5.4 液化场地车站结构的地震反应特征	213
5.6 覆盖层厚度对地铁地下车站结构地震反应的影响	216
5.6.1 覆盖层厚度对车站结构加速度反应的影响	217
5.6.2 覆盖层厚度对车站结构侧向变形的影响	219
5.6.3 覆盖层厚度对车站结构应力反应的影响	220
5.7 侧向地连墙对地铁地下车站结构地震反应的影响	221
5.7.1 数值计算方法	222
5.7.2 地连墙对车站结构底部地震动的影响	222
5.7.3 地连墙对车站主体结构侧向变形的影响	224
5.7.4 地连墙对车站结构顶底接触面摩擦剪力的影响	225
5.7.5 地连墙对车站结构地震破坏模式的影响	227
5.8 两层三跨框架式地铁地下车站结构抗震设计建议	229
5.8.1 软土场地地下车站结构抗震设计建议	229
5.8.2 可液化场地地下车站结构抗震设计建议	230
参考文献	231

第 6 章 三层三跨框架式地铁地下车站结构的抗震研究	233
6.1 引言	233
6.2 软弱场地三层三跨框架式车站结构振动台模型试验	234
6.2.1 模型试验设计	234
6.2.2 振动台试验结果与分析	237
6.2.3 模型试验与数值分析结果的对比	248
6.3 软土场地地下车站结构地震反应数值模拟	257
6.3.1 计算模型	257
6.3.2 车站结构的地震损伤及应力	258
6.3.3 车站结构的变形	262
6.3.4 车站结构加速度反应	264
6.4 可液化场地地下车站结构地震反应模型试验	266
6.4.1 模型试验设计	266
6.4.2 非破坏性振动台试验的结果与分析	270
6.4.3 破坏性振动台试验的结果与分析	298
6.4.4 模型试验与数值模拟的结果对比	305
6.5 不同场地条件下模型试验结果的对比	320
6.5.1 地基加速度反应的对比	320
6.5.2 地下车站结构侧向变形的对比	322
6.5.3 地表震陷特征	322
6.6 三层三跨框架式地下车站结构抗震设计建议	323
6.6.1 软土场地地下车站结构抗震设计建议	323
6.6.2 可液化场地地下车站结构抗震设计建议	324
参考文献	324
第 7 章 特殊结构形式的地铁地下车站结构抗震研究	326
7.1 引言	326
7.2 三拱立柱式地下车站结构的振动台模型试验	327
7.2.1 振动台模型试验设计	327
7.2.2 振动台模型试验结果与分析	332
7.3 三拱立柱式地下车站结构地震反应的数值模拟	354
7.3.1 计算模型	354
7.3.2 车站结构的地震损伤及应力	356
7.3.3 车站结构的水平向加速度反应	358
7.3.4 车站结构的水平向相对位移反应	359

7.4 上下层不等跨框架式地下车站地震反应的数值模拟	363
7.4.1 计算模型	363
7.4.2 车站结构的侧向位移反应	365
7.4.3 车站结构的应力反应	367
7.4.4 车站结构的地震损伤过程	369
7.4.5 车站结构侧墙的动土压力作用	372
7.5 含中柱支撑夹层板框架式地下车站结构地震反应的数值模拟	373
7.5.1 计算模型	373
7.5.2 车站结构的侧向变形	374
7.5.3 车站结构的应力反应	375
7.5.4 车站结构的加速度反应	378
7.5.5 车站结构的损伤过程	379
7.6 特殊结构形式地铁地下车站结构抗震设计建议	380
7.6.1 三拱立柱式地下车站结构抗震设计建议	380
7.6.2 上下不等跨数地下车站结构地震反应规律与抗震设计建议	380
7.6.3 含中柱支撑夹层板地下车站结构抗震设计建议	381
参考文献	382
第8章 地铁区间隧道地震反应的数值模拟	384
8.1 引言	384
8.2 双线水平平行地铁区间隧道的抗震分析	385
8.2.1 计算模型	385
8.2.2 区间隧道水平向位移和加速度反应	389
8.2.3 区间隧道的内力反应	394
8.3 双层竖向重叠隧道的抗震分析	406
8.3.1 计算模型	406
8.3.2 隧道结构的变形	407
8.3.3 隧道的应力反应	410
8.3.4 隧道结构的水平向加速度	411
8.4 交叉隧道的抗震分析	413
8.4.1 计算模型	413
8.4.2 交叉地铁隧道的相对水平位移反应	414
8.4.3 交叉地铁隧道交叉段的应力反应	417
8.4.4 交叉地铁隧道交叉段的水平向加速度反应	422
8.5 区间隧道抗震设计建议	423
8.5.1 水平双线平行隧道抗震设计建议	423

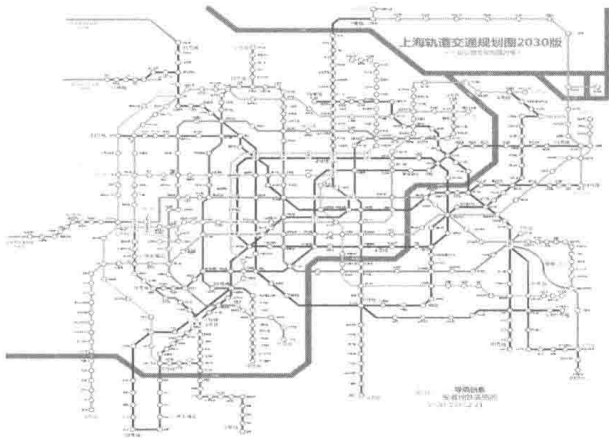
8.5.2	双层竖向重叠隧道抗震设计建议	424
8.5.3	交叉隧道抗震设计建议	425
	参考文献	425
第9章	地铁地下结构抗震设计的简化分析方法	427
9.1	引言	427
9.2	地震系数法	427
9.2.1	地震系数法原理	427
9.2.2	地震土压力计算方法	428
9.3	自由场变形法	430
9.3.1	自由场变形法原理	430
9.3.2	自由场变形的确定方法	431
9.3.3	计算实例	434
9.4	土-结构相互作用系数法	435
9.4.1	土-结构相互作用系数法基本原理	435
9.4.2	环形隧道的横向变形和内力	435
9.4.3	环形隧道的横向变形与内力	437
9.4.4	矩形隧道的横向变形和内力	440
9.4.5	计算实例	445
9.5	反应位移法	452
9.5.1	反应位移法原理	452
9.5.2	隧道和地下车站横向地震反应的反应位移法	453
9.5.3	隧道纵向地震反应的反应位移法	456
9.5.4	基于 PROSHAKE 和 ABAQUS 软件的反应位移法	457
9.5.5	反应位移法中自由场地侧向位移反应特征	458
9.5.6	计算实例	464
9.6	反应加速度法	467
9.6.1	反应加速度法原理	467
9.6.2	基于 PROSHAKE 和 ABAQUS 软件的反应加速度法	467
9.7	Pushover 法	468
9.7.1	水平荷载分布形式	469
9.7.2	目标位移的确定	469
9.7.3	地下结构 Pushover 法计算步骤	470
9.7.4	计算实例	470
9.8	集中质量法	476
9.8.1	自由场地震分析的集中质量计算模型	476

9.8.2 地下结构地震反应的集中质量计算模型	476
9.8.3 运动方程	477
9.8.4 地震反应简化分析方法的参数确定	480
9.8.5 计算实例	483
9.9 不同抗震设计简化分析方法比较	488
参考文献	494

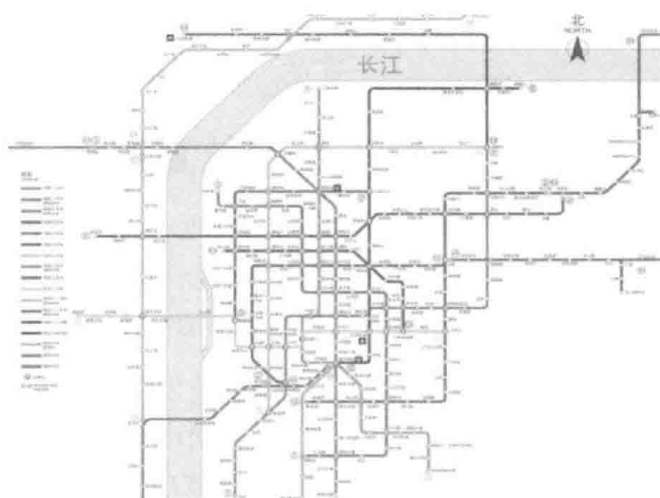
第 1 章 地下结构抗震概述

1.1 引言

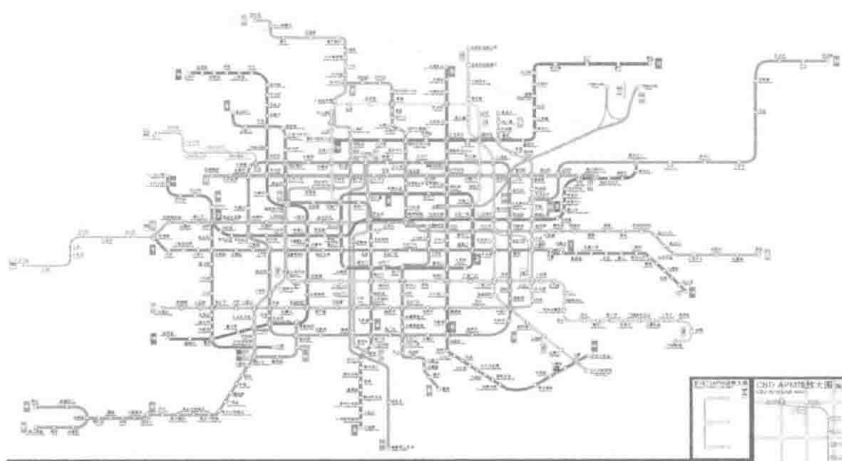
改革开放以来,我国城市规模和经济建设飞速发展,城市化进程日益加快,2015 年我国城镇化率已达到 56.1%,城市人口急剧增加,100 万人口以上的大城市已超过 140 个,其中 1000 万以上的已达到 6 个,约占全世界的 1/4。这些大城市一天的客运高峰期间,旅客高度集中,流向大致相同,低运量的交通工具已远远不能满足民众出行的需要。而发展多层次、立体化、智能化的轨道交通体系,是从根本上改善城市交通需求的重要战略措施之一。国际经验表明,当一个国家的城市化率超过 60%时,城市轨道交通将实现高速发展以解决大城市交通拥堵问题,从而拉动城市轨道交通建设投资迅速增加。据中国城市轨道交通协会发布的《城市轨道交通 2015 年度统计和分析报告》显示,2015 年末,中国大陆地区共 26 个城市开通城轨交通运营,共计 116 条线路,运营线路总长度达 3618km,其中地铁 2658km,其他制式城轨交通规模 960km。2015 年度新增运营线路长度 445km,在建线路总长 4448km。2016 年 5 月,国家颁布的《交通基础设施重大工程建设三年行动计划》表明:未来三年我国总新增城市轨道交通规划里程 2385km。至 2016 年 8 月,共有 45 个城市规划获批,规划规模近 5000km。新建、规划线路规模大、投资增长迅速,建设速度持续加快。城市轨道交通的快速发展必将为解决我国城市交通拥堵问题做出重要的贡献。我国主要城市的城市轨道交通规划图如图 1.1 所示。



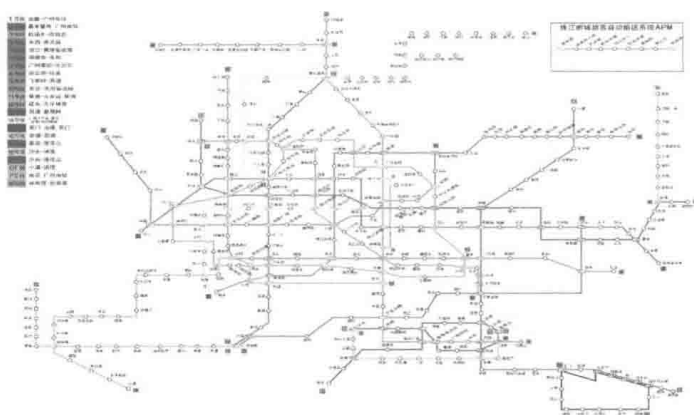
(a) 上海地铁规划图(2030 版)



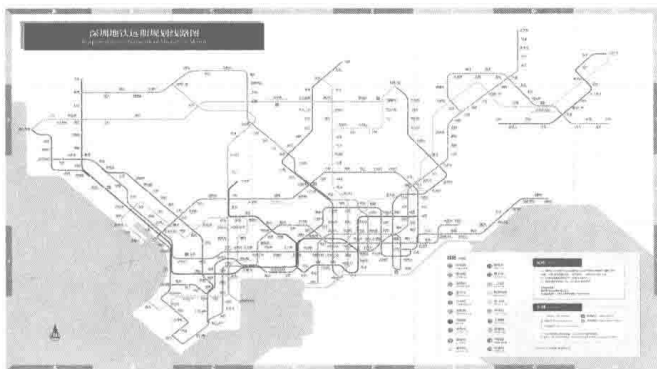
(b) 南京地铁规划图(2050 版)



(c) 北京地铁规划图(2020 版)



(d) 广州地铁规划图(2020 版)



(e) 深圳地铁规划图(2040 版)

图 1.1 我国部分城市地铁建设近期规划图

然而,我国位于世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带之间,受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的挤压,地震断裂带十分发育。20 世纪以来,中国共发生 $M_s 6.0$ 级以上地震近 800 次,1950~2010 年 60 年间共发生 $M_s 7.0$ 级及以上地震 65 次^[1];据国家地震科学数据共享中心网站数据,2011~2016 年期间发生 $M_s 7.0$ 级及以上地震 3 次。强地震遍布除贵州、浙江两省和香港特别行政区以外所有的省(自治区、直辖市)。根据我国强地震震中分布图(见图 1.2),可以看出,我国已建和将建城市轨道交通的绝大部分城市都位于不同的地震带上或附近。例如,南京、合肥、济南、大连和沈阳等大城市都位于郯城—营口地震带上或附近,自有记载以来到 2015 年,该地震带共发生 $M_s 4.7$ 级以上地震 60 余次,其中 $M_s 7.0 \sim 7.9$ 级地震 6 次(如 1969 年渤海 $M_s 7.4$ 级地震、1974 年海城 $M_s 7.4$ 级地震), $M_s 8.0$ 级以上地震 1 次(1668 年山东郯城 $M_s 8.5$ 级地震);北京、天津、石家庄、西安和郑州等大城市都位于华北平原地震带上或附近,据统计至 2013 年,该地震带共发生 $M_s 4.7$ 级以上地震 140 多次,其中 $M_s 7.0 \sim 7.9$ 级地震 5 次, $M_s 8.0$ 级以上地震 1 次;福州和厦门等城市都为华南地震区,这里历史上曾发生过 1604 年福建泉州 $M_s 8.0$ 级地震和 1605 年广东琼山 $M_s 7.5$ 级地震;兰州、宁夏、成都和昆明等城市都位于青藏高原地震区,据统计至 2013 年,该地震带 $M_s 8.0$ 级以上地震就发生过 9 次; $M_s 7.0 \sim 7.9$ 级地震发生过 78 次,均居全国之首。其中,2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震和 2010 年玉树 $M_s 7.1$ 级地震就位于该地震区的喜马拉雅地震带上。据统计,2000~2015 年,我国发生 $M_s 7.0$ 级以上大地震就多达 11 次。地震给我国造成了巨大的人员伤亡和经济损失。

已有的地震震害表明^[2~4]:在强地震发生时,现有的地铁结构并不安全。在地铁地下结构的震害方面,如 1985 年墨西哥 $M_s 8.1$ 级地震中,建在软弱地基上的地铁侧墙与地表结构相交部位发生分离破坏现象;特别是 1995 年 $M_s 7.2$ 级日本“阪神地震”对神户市内地下结构造成了有史以来最严重的破坏,地铁、地下停车场、