

城市轨道交通结构抗震设计



王君杰 黄勇 董正方 赵密 著

中国建筑工业出版社

城市轨道交通结构抗震设计

王君杰 黄 勇 董正方 赵 密 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

城市轨道交通结构抗震设计/王君杰等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2019. 3
ISBN 978-7-112-23047-1

I. ①城… II. ①王… III. ①城市轨道交通-防震设计 IV. ①U239. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 274440 号

本书围绕最新版的《城市轨道交通结构抗震设计规范》编写而成, 全面、系统、详细地介绍了轨道交通结构抗震设计的基本理论、设计计算方法、构造措施和应用案例。该书的著者为《城市轨道交通结构抗震设计规范》的编制人, 其中, 本书第一著者——同济大学土木工程学院桥梁工程系教授王君杰亦为该规范的主编人, 因此该书所讲述的内容具有理论水平高、技术先进、数据严谨、结论可靠的特点。

该书可以与《城市轨道交通结构抗震设计规范》配合阅读使用, 以便读者加深对该规范的理解; 该书更是一部城市轨道交通结构抗震设计的专著, 一部难得的好书, 适合高等院校相关专业的师生、科研机构的相关专业人员和结构设计人员阅读使用。

责任编辑: 张伯熙

责任校对: 党蕾

城市轨道交通结构抗震设计

王君杰 黄勇 董正方 赵密 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 27 字数: 671 千字

2019年4月第一版 2019年4月第一次印刷

定价: 85.00 元

ISBN 978-7-112-23047-1

(32576)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

著者简介

王君杰，1962年生人。1985年毕业于哈尔滨建筑工程学院道路桥梁专业，获学士学位；1988年于中国地震局工程力学研究所获地震工程专业硕士学位；1993年于中国地震局工程力学研究所获地震工程专业博士学位；1993~1995年在大连理工大学土木工程博士后流动站工作；1995年秋起在同济大学工作，现为同济大学土木工程学院桥梁工程系教授。主要从事桥梁抗震和桥梁冲击方面的研究。迄今为止负责或参加了20余项国家或部委等的研究项目，负责了较多重大桥梁工程的抗震专题研究工作，发表抗震相关论文100余篇。主编了《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909—2014。

住房和城乡建设部城市轨道交通标准化技术委员会委员，中国地震学会强震动观测技术与应用专业委员会委员，中国地震学会地震工程专业委员会委员，上海市振动工程学会常务理事。

前 言

城市轨道交通，具有高速、准时、低能耗、少污染、安全、舒适、运量大等特点，是大城市解决公共交通问题的主要工具之一。

2003年9月，国务院发布《关于加强城市快速轨道交通建设管理的通知》，我国众多大中城市进行了城市轨道交通规划，并将成为大中城市公共交通的主要工具，影响到城市和区域功能的正常运转。

1995年日本兵库县南部地震造成了轨道交通系统的严重震害，引起了工程界的广泛重视。我国很多大城市处于强震区，城市轨道交通的抗震安全是一个需要考虑的重要问题。由于我国技术管理体制的特点，公路、铁路和建筑抗震分别由不同部门制定技术标准，在技术路线、技术要求、计算和验算方法、材料参数取值等方面不能协调一致，给城市轨道交通结构的设计者造成了很大的困扰。为解决此问题，2007年，建设部标准定额司立项编写《城市轨道交通结构抗震设计规范》GB 50909—2014，并于2014年颁布执行。

为系统地阐述城市轨道交通结构抗震设计的主要理论和方法问题，以作者在地震工程领域多年来的研究为基础，参考和吸收了日本、美国和欧洲等国家和地区的相关抗震研究成果，完成此书。全书分为8章，王君杰负责本书内容设置和章节划分，并负责第1章、第2章的2.1~2.5节、第5章、第6章以及附录B、附录D的撰写；黄勇负责第3章、第8章的撰写；董正方负责第4章、第7章和附录C的撰写；赵密负责了第2章的2.6节、2.7节及附录A的撰写。

第1章重点总结了国内外城市轨道交通结构的典型震害，并对工程结构抗震设计理论的发展和规范现状进行了概要总结。第2章对相关的重要抗震分析理论与方法进行了阐述，特别强调了土体计算域及虚拟计算边界问题。第3章叙述了城市轨道交通地上结构的建模和分析方法，对扣件的静、动力本构模型和超长高架区间结构的地震反应计算方法进行了重点讨论。第4章讨论了城市轨道交通地下结构的抗震建模和设计计算方法。第5章对基于性能抗震设计方法的研究成果进行了详细总结，对基于性能抗震设计的整体框架进行了系统的论述。第6章对城市轨道交通结构的各种验算指标和验算方法进行了系统的阐述。第7章和第8章对城市轨道交通结构的抗震构造措施和减震措施进行了讨论。

研究生陈玮、颜海泉、伊藤隆吉、张宁勇、罗荃、陆锐、章小檀、陈虎、贾明晓、燕斌、韩鹏、高磊、董正方、郭进、王青桥、姚毅超、何剑、王文彪等的学位论文在不同程度上对本书的完成作出了贡献，第一作者对学生们辛勤和出色的工作表示感谢。感谢博士研究生苏俊省和宋彦臣，硕士研究生尹海蛟、高昊、朱红云等在书稿整理过程中完成的大量文字整理和绘图工作。

感谢扬州大学建筑科学与工程学院陈令坤副教授为第5章第5.10节提供的素材和计算结果。

感谢天津轨道交通集团有限公司在《城市轨道交通结构抗震设计规范》编写过程中所提供的各方面的大力支持。感谢《城市轨道交通结构抗震设计规范》编写组一起工作的来自不同单位的专家，规范编写过程中对相关理论和技术问题的讨论，使本书少出现错误。特别感谢北京工业大学的亓路宽教授、中国城市建设研究院有限公司交通院秦国栋院长、天津轨道交通集团有限公司朱敢平总工程师的大力支持。

本书的完成，部分得到了国家重点研发计划“长线型地面交通结构地震破坏效应分析及韧性抗震技术(2018YFC1504306)”、国家自然科学基金项目“缆索承重桥梁地震破坏机制的数值模拟方法研究(90715022)”、“城市轨道交通高架桥约束连接系统抗震性能研究(51278471)”“城市轨道交通地下结构抗震计算方法与性能指标研究(51408195)”，中国地震局行业专项“高烈度区高墩大跨桥梁地震破坏预测与控制(200808021)”，住房和城乡建设部项目“强震区城市轨道交通结构抗震设计理论与关键技术研究(2008-k3-1)”，天津市建设管理委员会项目“天津城市轨道交通建设与运营安全关键问题与技术研究(2008-25)”，住房和城乡建设部标准定额司项目“城市轨道交通结构抗震设计规范(20072205)”等项目的支持，特此致谢。

城市轨道交通结构抗震涉及地上和地下结构、涉及结构安全和行车安全，十分复杂，一直缺少系统的论述和整合。作者不揣冒昧写成此书，希望可以为我国的工程设计人员提供一本较为系统的参考资料。由于作者水平所限，加之该领域针对性的研究工作仍有待进一步的加强和深入，因此书中疏漏与疑问之处在所难免，恳请读者不吝批评指正。

2018年秋于同济大学桥梁馆

目 录

第 1 章 轨道交通结构震害与抗震设计概况	1
1.1 轨道交通地上结构震害	1
1.1.1 轨道交通地上结构主体构件震害	1
1.1.2 轨道交通桥梁支座震害	7
1.2 地下结构震害	13
1.3 列车地震脱轨震害	19
1.4 轨道交通结构抗震设计概况	21
1.4.1 震害现象分析	21
1.4.2 建模与计算方法	23
1.4.3 抗震措施与技术	24
1.4.4 城市轨道交通结构抗震设计规范概况	25
参考文献	26
第 2 章 抗震计算基本理论	28
2.1 有限域土-结构地震相互作用体系运动方程	28
2.1.1 有限域土-结构地震相互作用模型	28
2.1.2 运动方程	28
2.2 线弹性运动方程求解的直接积分法	31
2.2.1 线性单自由度振动方程求解的一次多项式内插方法	32
2.2.2 线性单自由度振动方程求解的三次多项式内插方法	33
2.2.3 单自由度振子的差分算法	34
2.2.4 Newmark 方法族	34
2.2.5 小结	35
2.3 线弹性运动方程求解的向量叠加法	37
2.3.1 结构的自由振动频率与振型	37
2.3.2 振型向量叠加法	37
2.3.3 单一荷载空间分布模式的 LDR 叠加方法	38
2.3.4 多荷载空间分布模式的 LDR 叠加方法	39
2.3.5 向量叠加法计算效率的比较	40
2.4 非线性动力学方程求解	42
2.4.1 增量直接积分方法	42
2.4.2 基于 LDR 缩减模型的快速非线性动力分析	42
2.5 振动阻尼	44
2.5.1 阻尼参数的实测	44

2.5.2	材料的物理阻尼模型	46
2.5.3	数学阻尼模型	48
2.5.4	复杂结构阻尼比确定的模态应变能比值法	49
2.6	土体水平计算域尺度	50
2.6.1	案例基本参数	50
2.6.2	侧向边界处置方式的影响	53
2.6.3	土体阻尼对水平计算尺度的影响	56
2.6.4	结构尺度对水平计算尺度的影响	61
2.6.5	地震动特性对水平计算尺度的影响	63
2.6.6	B/H 的工程设计取值	65
2.7	底边界与地震动输入	67
2.7.1	场地反应分析中等效基岩面的确定	67
2.7.2	土-结构相互作用分析中计算模型底边界的设置	67
2.7.3	包含地下结构的深厚覆盖土层	71
2.7.4	包含地下结构的浅薄覆盖土层	73
	参考文献	76
第3章	地上结构抗震计算	78
3.1	地上结构抗震计算建模概要	78
3.1.1	高架区间与高架车站整体构造	78
3.1.2	道床结构形式	80
3.1.3	抗震建模概要	80
3.2	轨道扣件	81
3.2.1	简述	81
3.2.2	纵向单向静力拉伸试验	82
3.2.3	双向拉压拟静力循环加载试验	83
3.2.4	纵向双向拉压变频动力加载试验	87
3.2.5	纵向循环加载下的滞回特征	90
3.3	道床系统建模	93
3.3.1	板式整体道床	93
3.3.2	支承块-承轨台道床	94
3.3.3	弹性支承块-承轨台道床	95
3.4	支座	96
3.4.1	简述	96
3.4.2	支座的力-位移关系模型	98
3.4.3	支座破坏后的力学模型	100
3.5	结构-桩-土地震相互作用的集中参数模型	102
3.5.1	结构-桩-土地震相互作用集中参数模型概要	102
3.5.2	拖曳元件	105
3.5.3	缝隙元件	106

3.5.4	土材料元件	107
3.5.5	宏单元综合力学行为	109
3.5.6	群桩效应	111
3.5.7	桩-地震相互作用集中参数模型的规范化考虑	111
3.6	刚性基础-地震相互作用模型	117
3.6.1	刚性基础集中参数模型	117
3.6.2	刚性基础集中参数模型的等效地震动输入	120
3.7	轨道-扣件-梁简化耦合建模	122
3.7.1	轨道约束对高架区间地震反应的影响	122
3.7.2	考虑轨道约束影响的简化建模方法	129
3.8	弹性反应谱方法	131
3.8.1	反应谱的定义	131
3.8.2	一致地震动输入下的振型组合法	132
3.8.3	多点地震动输入下的振型组合法	133
3.8.4	多方向地震动输入下的反应谱组合	135
3.9	弹塑性反应谱方法	141
3.9.1	基本方法	141
3.9.2	应用案例	144
3.10	车辆-桥梁地震相互作用	148
3.10.1	引言	148
3.10.2	车辆-轨道-桥梁-基础-地基耦合系统地震相互作用全局分析模型	150
	参考文献	155
第4章	地下结构抗震计算	158
4.1	地下结构构造及抗震建模	158
4.1.1	横断面	158
4.1.2	连接构造	160
4.1.3	抗震建模概要	164
4.2	地下结构连接部位抗震建模	166
4.2.1	盾构法隧道接头抗震建模	167
4.2.2	沉管法隧道接头抗震建模	170
4.3	横向抗震静力计算方法	172
4.3.1	概述	172
4.3.2	横向反应位移法	172
4.3.3	反应加速度法	175
4.3.4	精度比较	178
4.4	纵向抗震计算方法	181
4.4.1	纵向解析方法	182
4.4.2	纵向多质点-弹簧方法	184
4.4.3	纵向反应位移法	186

4.4.4 算例	188
4.5 断层效应	191
4.5.1 断层及其震害	191
4.5.2 断层效应的计算方法	192
4.5.3 算例	194
4.6 重力的影响	198
4.6.1 重力对土体性质的影响	198
4.6.2 重力对地震反应影响的计算方法	199
4.6.3 重力影响的案例分析	202
参考文献	207
第5章 基于性能的抗震设计	210
5.1 基于性能抗震设计方法概要	210
5.1.1 基于性能抗震设计思想产生的背景	210
5.1.2 基于性能抗震设计规范的发展概况	211
5.2 性能目标	215
5.2.1 抗震设防类别	215
5.2.2 抗震设防水准	217
5.2.3 抗震性能等级	220
5.2.4 抗震设防目标	225
5.3 规范化设计地震动参数	228
5.3.1 美国《公路桥梁抗震设计指南》地震动参数的描述方式	228
5.3.2 日本道路和铁路抗震设计规范关于设计地震动的规定	230
5.3.3 欧洲规范设计地震动参数的描述方式	234
5.3.4 《城市轨道交通结构抗震设计规范》的设计地震动参数	236
5.3.5 规范设计地震动参数的应用方法	238
5.4 基于性能的抗震需求计算方法	239
5.4.1 概述	239
5.4.2 振型线性静力分析方法	239
5.4.3 振型非线性静力分析方法	241
5.4.4 能力谱方法	243
5.4.5 基于位移的振型非线性静力分析方法	246
5.4.6 增量动力分析	247
5.4.7 简评	249
5.5 基于性能的抗震概念设计	250
5.5.1 能力设计原则	250
5.5.2 AASHTO 抗震设计指南中的性能控制基本原则	251
5.5.3 日本抗震设计规范中的性能控制基本原则	254
5.5.4 新西兰桥梁抗震规范	255
5.6 小结	257

参考文献	257
第 6 章 抗震性能指标和等级	260
6.1 钢筋混凝土柱式构件抗震验算	260
6.1.1 抗剪能力	260
6.1.2 抗弯性能	262
6.2 型钢混凝土构件抗震能力	266
6.2.1 抗剪能力	266
6.2.2 抗剪计算公式对比	269
6.2.3 抗弯能力	270
6.3 钢管混凝土构件抗震能力	271
6.3.1 抗剪能力	271
6.3.2 抗弯性能	272
6.4 墙式混凝土构件抗震验算	273
6.4.1 日本《铁路结构设计规范(抗震设计篇)》的规定	273
6.4.2 美国 AASHTO 规范墙式墩抗剪计算	274
6.4.3 《混凝土结构设计规范》剪力墙受剪承载力计算公式	275
6.5 桩基础抗震设计	276
6.6 扩大基础抗震验算	280
6.7 支座抗震验算	282
6.7.1 简述	282
6.7.2 日本铁道抗震设计规范中支座性能等级和验算方法	283
6.7.3 日本铁道抗震设计规范中橡胶支座体系损伤水平的验算	286
6.7.4 《城市轨道交通结构抗震设计规范》支座验算的规定	288
6.8 地下结构整体变形验算	289
6.8.1 整体变形指标	290
6.8.2 层间位移角	292
6.8.3 直径变形率	293
6.9 地下结构接缝变形验算	295
6.10 地震时车辆运行安全与轨道功能恢复校验	296
6.10.1 基于力的出轨安全准则	296
6.10.2 地震时横向振动位移的检验	298
6.10.3 地震时车辆运行安全性轨面位移差校验	301
6.10.4 地震时轨道可修复性位移差校验	302
参考文献	303
第 7 章 抗震构造措施	306
7.1 引言	306
7.2 高架区间	306
7.2.1 上部结构	306
7.2.2 墩柱	311

7.2.3 节点	318
7.2.4 基础	321
7.3 地下结构	324
7.3.1 总体构造要求	324
7.3.2 钢筋	327
7.3.3 接缝	331
7.3.4 防水措施	331
7.3.5 抗浮措施	333
参考文献	334
第8章 抗震保护技术	336
8.1 引言	336
8.2 减隔震支座	338
8.2.1 盆式支座	338
8.2.2 球形钢支座	339
8.2.3 隔震支座	341
8.2.4 功能一体型支座与分离型组合式支承连接系统	343
8.2.5 熔断保护装置	344
8.2.6 减隔震支座效果案例评价	346
8.3 阻尼耗能装置	348
8.3.1 流体粘滞阻尼器	348
8.3.2 软钢阻尼装置	349
8.3.3 流体粘滞阻尼器应用案例	350
8.4 高架区间连接系统	351
8.4.1 连梁装置	351
8.4.2 限位装置	354
8.5 地下结构减隔震技术	356
8.5.1 改变结构性能	356
8.5.2 设置减震层	357
8.6 防脱轨系统	358
参考文献	361
附录 A 粘弹性边界和地震自由场反应	363
A.1 粘弹性边界	363
A.1.1 一维模型	363
A.1.2 二维模型	364
A.1.3 三维模型	365
A.1.4 应用说明	367
A.2 平面体波倾斜入射二维均匀半空间时虚拟计算边界上的地震作用	367
A.2.1 二维模型	367
A.2.2 P波输入	368

A. 2.3 SV 波输入	369
A. 3 平面体波倾斜入射三维均匀半空间时虚拟计算边界上的地震作用	370
A. 3.1 三维模型	370
A. 3.2 P 波倾斜输入	370
A. 3.3 SV 波倾斜输入	372
A. 3.4 SH 波倾斜输入	374
参考文献	375
附录 B p-y 元件、t-z 元件和 q-z 元件参数的确定方法	377
B. 1 p - y 元件参数的具体确定方法	377
B. 1.1 软粘土的 p - y 曲线	377
B. 1.2 水下硬粘土的 p - y 曲线	378
B. 1.3 水上硬粘土的 p - y 曲线	379
B. 1.4 砂土的 p - y 曲线	380
B. 1.5 API 砂土的 p - y 曲线	381
B. 2 t - z 元件参数的具体确定方法	382
B. 2.1 砂土 t - z 曲线 (Duan, 1999)	382
B. 2.2 砂土 t - z 曲线 (Wang 等, 1993)	383
B. 2.3 粘土 t - z 曲线 (Duan, 1999)	383
B. 2.4 粘土 t - z 曲线 (Wang 等, 1993)	384
B. 3 q - z 元件参数的具体确定方法	384
B. 3.1 砂土 q - z 曲线 (Duan, 1999)	384
B. 3.2 砂土 q - z 曲线 (Wang 等, 1993)	385
B. 3.3 粘土 q - z 曲线 (Duan, 1999)	386
B. 3.4 粘土 q - z 曲线 (Wang 等, 1993)	386
参考文献	387
附录 C 盾构隧道接头弹簧刚度	388
C. 1 管片接头的转动弹簧刚度	388
C. 1.1 概要	388
C. 1.2 确定方法	388
C. 2 环间接头的剪切弹簧刚度	394
C. 3 纵向转动弹簧刚度	394
C. 3.1 志波等的计算方法	394
C. 3.2 西野的计算方法	395
参考文献	396
附录 D 构件剪切和弯曲模型	397
D. 1 型钢混凝土构件抗剪能力计算的若林·南模型	397
D. 1.1 型钢部分抗剪计算	397
D. 1.2 钢筋混凝土部分抗剪计算	398
D. 1.3 基于若林·南模型的型钢混凝土构件受剪承载力 N - V 相关方程	405

D.2 型钢混凝土柱三折线模型	408
D.2.1 屈服点 F_y 和 Δ_y 的确定	408
D.2.2 峰值点 F_m 和 Δ_m 的确定	410
D.2.3 极限点 F_u 和 Δ_u 的确定	410
D.3 日本《公路桥梁设计规范（V 抗震设计篇）》对钢管混凝土构件抗弯能力的 规定	411
D.3.1 空心钢管墩	411
D.3.2 钢管混凝土桥墩	413
D.4 韩林海三折线模型	414
D.4.1 圆形钢管混凝土柱	414
D.4.2 矩形钢管混凝土柱	416
参考文献	417

第 1 章 轨道交通结构震害与抗震设计概况

1.1 轨道交通地上结构震害

1.1.1 轨道交通地上结构主体构件震害

调查资料显示, 强烈地震经常会造成轨道交通结构的严重破坏。轨道交通地上结构的典型震害形式有: 地上车站及高架区间等垮塌、落梁, 墩柱倾覆或断裂, 基础沉塌, 支座及连接装置破坏, 轨道弯曲失效等。

Mizuno 和 Nozawa^[1]统计了日本新干线在 1995 年阪神地震、2004 年新潟地震、2011 年东北大地震主震和大余震中震损情况, 见表 1.1-1。

日本新干线震害统计^[1]

表 1.1-1

地震	1995 阪神地震	2004 新潟地震	2011 东北地震	
日期	1995.1.17	2004.10.23	2011.3.11	2011.4.7
震级	7.3	6.8	9	7.1
死亡人数	6434	68	19238	4
基础设施损失(RMB 亿元)	4950	850	8450	
震损线路及长度(km)	山阳线(83)	上越线(65)	东北线(536)	
脱轨(处)	0	1	1 ^[19]	0
相关人员伤亡(人)	0	0	0	0
垮塌桥梁(座)	8	0	0	0
桥梁落梁(座)	72	1	2	7
高架桥墩柱损伤(根)	708	47	约 100	约 20
隧道损伤(座)	4	4	0	0
铁路电杆损伤(根)	43	61	约 540	约 240
铁路变压器损伤(个)	3	1	约 10	约 10
恢复天数	82	67	49	

注: 损失换算按 1 元人民币 (RMB) 兑换 20 日元计算。

1995 年日本阪神地震时, 铁路系统受灾比较严重。受到影响的有 JR 山阳新干线、JR 东海道本线、阪急电铁、阪神电铁、神户新交通 Port Island 线等^[2]。以框架结构为主的铁路高架桥受到了很大的破坏, 严重震害区段, 如从下食满高架桥处的新大阪站到六甲隧道入口, 共有 5 座高架桥 (9 联) 严重破坏^[3], 其中 2 层框架式 3 座 (7 联), 1 层框架式 2 座 (2 联)。大多为剪切破坏, 尚未完全破坏的墩柱上下端虽然也出现弯曲损伤, 但伴随水平剪切的轴压力的作用明显。

下食满高架桥是一座2层3跨RC框架式高架桥，其地面以上构造如图1.1-1^[4]；十多米长桩基础跨越冲积层（10~20m），支撑在洪积砂砾层上，强烈地震动使墩柱上端破坏而整体下挫1层；第一野间高架桥是一座1层3跨RC框架式高架桥，处于台地地质上，桩基础支撑在洪积砂砾层上，因墩柱上端破坏而落梁；时友高架桥是一座2层3跨RC框架式高架桥，桩基础支撑在武库川薄冲积砂层下洪积砂砾层上，因墩柱上端破坏而横向下挫1层。阪水高架桥是一座2层3跨RC框架式高架桥，桩基础穿过不足10m的冲积粘土层支撑在洪积砂砾层上，因墩柱上端破坏而下挫1层。神呪高架桥是一座1层3跨RC框架式高架桥，桩基础也在冲积层上，但处于与山地交界处倾斜面上，因墩柱上端破坏而落梁。该区段典型震害如图1.1-2^[3,5]。

2011年日本东北地方太平洋冲地震使日本东北、关东等地的铁路设施遭到破坏，东北新干线、三陆铁道、仙台市地下铁等都有震害现象出现^[6]。

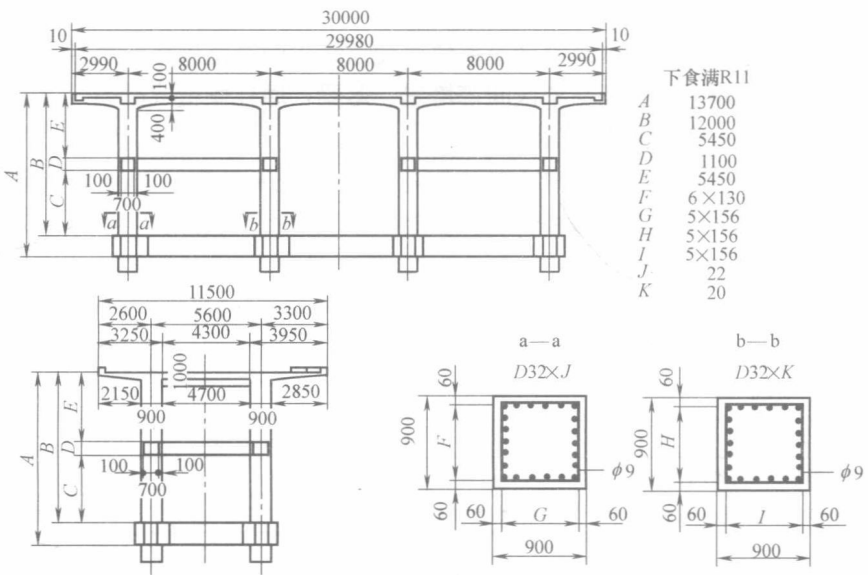


图 1.1-1 下食满高架桥构造图（单位：mm）

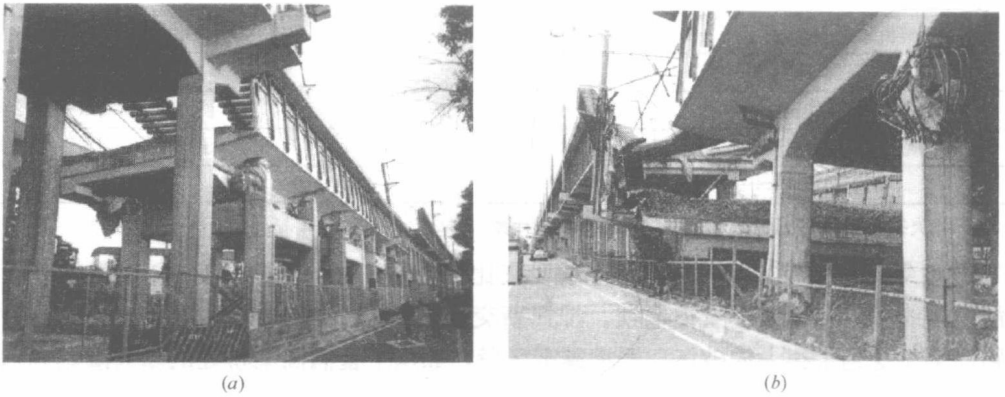


图 1.1-2 日本神户地震时铁路高架桥破坏情况（一）

(a) 下食满高架桥整层下挫（2层消失）；(b) 第一野间高架桥落梁

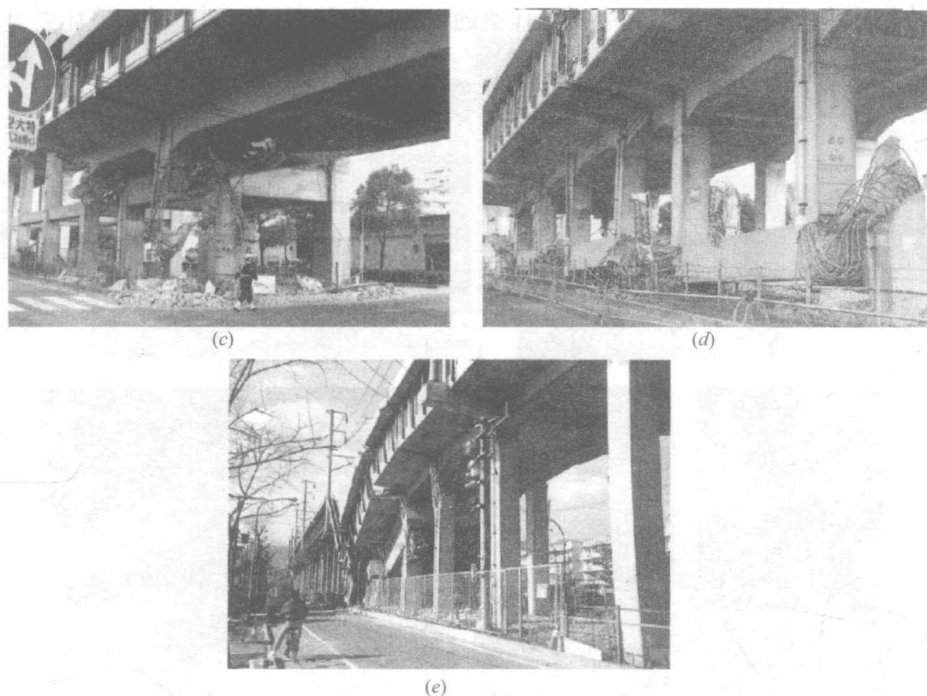


图 1.1-2 日本神户地震时铁路高架桥破坏情况 (二)

(c) 时友高架桥整层横向下挫 (2层消失); (d) 阪水高架桥整层下挫 (1层消失); (e) 神户高架桥落梁

2011 年日本东北地方太平洋冲地震使得日本东北、关东等地的铁路设施遭到破坏, 东北新干线、三陆铁道、仙台市营地下铁等都有震害现象出现。

第 1 中曾根高架桥^[6]位于日本岩手县北上市, 是一座 9 联 3 跨或 4 跨框架中间简支梁组成的单层高架桥, 其桥墩高为 7.5m, 墩柱尺寸为 0.85m×0.85m, 桩基础, 其结构形式及震害示意如图 1.1-3, 具体桥墩震害情况如图 1.1-4。可以看出, 该框架式高架桥

