

结构札

Structure
Sketches

曲哲
著



中国建筑工业出版社

结构札记

曲 哲 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

结构札记/曲哲著. —北京: 中国建筑工业出版社,
2014. 2

ISBN 978-7-112-16183-6

I. ①结… II. ①曲… III. ①建筑结构-抗震结构
IV. ①TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 287539 号

结 构 札 记

曲 哲 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/32 印张: 7 字数: 170 千字

2014 年 7 月第一版 2014 年 7 月第一次印刷

定价: 19.00 元

ISBN 978-7-112-16183-6

(24938)

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)

本书在回顾地震工程百年历程的基础上，介绍了地震工程的基本概念，以减震、隔震技术为切入点，探讨了以追求高恢复力为特征的当代地震工程的发展趋势，剖析了汶川地震、东日本地震和芦山地震在建筑结构震害和恢复重建方面的特征。本书还撷取环太平洋地震带上的代表性建筑，追溯了百年抗震背景下现代建筑的百年梦想。在本书的最后，还简要探讨了结构工程师的自我定位。

本书内容由点及面，深入浅出，具有内在的系统性，可供结构工程与地震工程相关专业人员参考，也有助于非专业人士走近地震，了解地震工程的最新动向。

责任编辑：赵梦梅 田立平

责任设计：董建平

责任校对：李美娜 赵颖

序

建筑不仅是一座城市的文化和历史的载体，是人们在学习工作之后身体得到休息和心灵得以安息的居所，更是遮风避雨的庇护所。而相对于风雨等自然现象，强烈地震发生时建筑还应能够保护居住者的生命，也就是说建筑本身也是人们的生命庇护所。谢礼礼院士曾指出：“地震灾害的本质其实就是土木工程灾害。”中国地震局工程力学研究所孙柏涛研究员也说过：“建筑离你有多远，地震就离你有多远。”一座优秀的建筑一定有一位优秀的结构工程师，其优秀之处不仅体现在实现了建筑师的创意，更在于确保建筑师的作品能经历风雨和其他自然灾害，其中地震最可能导致建筑破坏甚至倒塌，历史上许多优秀的建筑因地震而消失，使现代的人们无法一睹其精彩的芳容，只能在一些遗址上想象那些建筑之美。

1976年在我上中学期间发生了唐山大地震。虽然远离唐山地震灾区，但我所居住的地方的人们在唐山大地震后大半年的时间里都是在防震棚中度过的。在东南大学学习期间我又经历了1979年7月9日江苏省溧阳6.0级地震。学校专门组织我们土木系的学生到溧阳地震灾区考察，初步获得建筑抗震的有关知识，至今仍记得当时考察的经历。研究生阶段开始接触建筑结构抗震方面的研究。2008年汶川8.0级特大地震造成的大量人员伤亡基本都是建筑倒塌造成的。2008年汶川8.0级特大地震发生后，我第一时间赶赴灾区进行考察，获得了许多第一手震害调查资料，期间我的学生曲哲也几次一同前往灾区考察调

研，并开展了相关研究工作。其博士论文也是围绕结构抗震设计理论和方法领域开展工作的。

曲哲出生于古都西安，文笔很好，在攻读博士期间针对课题研究、社会热点问题和生活中的方方面面写了不少博客，还获得过中国科协的优秀科技博客奖。攻读博士期间，曲哲于2008年赴日本跟随日本著名建筑结构抗震专家和田章先生继续从事建筑结构抗震研究方面的交流合作研究。在此期间，他最先将摇摆墙结构抗震控制技术引入我国，并积极总结了日本的结构抗震加固方法，一些研究心得也时常在博客上出现。2010年在清华大学取得工学博士学位后，曲哲再次东渡日本，跟随和田章先生继续从事相关研究工作。日本的建筑抗震技术在国际上是先进的，曲哲也时常将在日本期间参与或了解到的抗震技术的新进展和点滴感悟发表在博客上，其中也包括许多他所喜爱的建筑。这段时间我时常看他的博客，感觉其中有许多有价值的东西，因此建议他将有关建筑结构的博文整理结集，于是便有了这本《结构札记》。书中内容涉及建筑结构抗震的发展历史和基本知识、国际前沿的抗震技术、近年来几次大地震的典型震害，以及他所喜爱的优秀建筑。希望这本书的读者能够以一种轻松的阅读方式思考建筑抗震的各个方面，让我们能够留住更多给我们带来美好生活的建筑。

叶列平

2013年7月16日于清华大学

回到原点，做更好的建筑^①

建筑在衣食住行中占有一席之地，足见其重要。它为我们的人生提供了一个大舞台。住宅的兴建、办公楼的完工、城市里新剧场的落成，都值得人们纪念。建筑一边勾勒我们的生活街区，一边孕育着历史与风土。不论是传统建筑、摩天大楼、乡土住宅，还是世界上各种各样不同的文化与空间，都丰富着我们的知识与心灵。

建筑的另一个重要使命是守护我们的生命和财产。人类娇小而柔弱，建筑却庞大而坚硬。人们兴建建筑，发展城市，自然希望它们在自然灾害面前能够保护我们的生命和财产，即建筑不会倒塌，即使有所损坏也应在很短的时间内修复，使社会经济活动得以恢复正常。这样看来，从事建筑工作的我们，实际担负着培育心灵与文化的重大责任。

2011年3月11日的东日本地震造成日本自1923年关东大地震以来最为惨重的一次自然灾害，约两万人失去了宝贵的生命。天灾之中还有人祸。就在今天早上，我听新闻里说有个小孩子在作文里写道：“真的是东京电力的错吗？或者是核电站的错吗？难道不是一天都离不开电力的全体国民的错吗？”回想起东京市长石原慎太郎曾说过“建核电站是为了让东京的赌场灯

① 本文系根据东京工业大学名誉教授和田章（Akira Wada）先生于2011年就任日本建筑学会第52代会长的致辞以及相关访谈记录整理、编译而成。相关日文原文曾刊载于由日本建筑学会发行的《建築雑誌》2011年6月号和7月号。

火通明”这样的话，真不知我们到底都干了些什么。

稍稍回溯一下历史，日本在江户末年明治初年的时候，人们都还穿着和服，住在通风良好的住宅里。也正是从那时开始，日本开始接受欧洲“富国强兵”的文化。现在大家都穿西装，我也经常会打领带，而这不过是为了带来一点过气的英伦风情而已。今年八月我漫步于伦敦街头时，身着西装感觉正合适。但英国与日本的风土人情毕竟迥异。我不禁要问，作为一种时尚，在日本大行其道一百多年的西方文明真的是好的吗？

从事建筑工作本应是很快活的事情。年轻人买房很不容易。通常有能力买房或是建造私宅的人都有健康而幸福的家庭，并且对房子怀有一种期待。办公楼、工厂的建设也是这样，我们的客户总是健康而富有朝气的。与之相反，从事律师、医生等职业的人，总在解决纠纷或是给病人看病，眼前所见大多是生了病的人。从事建筑的人拿着别人的钱设计建造自己心中的建筑，我觉得这种好事儿怕是绝无仅有了。建筑上的难题固然很多，并且不得不认真对待，但一想到建筑竟是这么好的职业，也应该拼命努力才对。怀着这样的心情方可创造出优美的城市，文化也随之而生了。

从城市与文化的角度看，如果去日本海一侧的那些曾经古朴而美丽的街道走一走，便会发现许多不协调的建筑。不论走到哪里，车站前的广场都是一个模样。虽说是特意要做出一个模样，以免出现什么奇奇怪怪的东西来，但设计还是要认真地用心去做啊。说到设计，之前曾几次因为飞机晚点而在埃罗·沙里宁设计的华盛顿杜勒斯国际机场滞留了好几个小时。这座被载入建筑学教科书的候机楼，至今还能很好地发挥作用。而在它之后修建的日本羽田机场的候机楼好像已经废弃了吧。现在的候机楼其实是后来增建的。认真地做设计，让建筑能够

长期地发挥作用，是一件非常重要的事。

结构工程师也是一样。仅仅关注于那些复杂晦涩的法律法规，大多数设计工作又依赖计算机程序来完成，就无法用心感受那些住在建筑里的孩子们和指望在这座建筑里安度晚年的爷爷奶奶们的心情。城市里人口越来越密集，乡村的房子又都盖成了一个模样，这里面都缺乏深入的思考。在这种意义上，我认为我们应该回到原点，认真地去思考一个最基本的问题：为何而建筑？

和田章 作

曲哲译

2011年7月于东京

目 录

1 地震工程初探	1
百年抗震	1
震度法	1
反应谱	3
非线性	5
高层化	7
地震动	8
地震的大小	9
震级	10
烈度	13
设防烈度	17
地震是不可控的	20
地震预期	20
地震预测	22
地震预警	25
工程结构是可控的	29
工程结构试验	31
结构地震反应分析	37
抗震规范	39
美国	40
日本	43

2 地震工程进阶	49
延性是什么	49
所谓延性设计	49
关于延性的认知鸿沟	51
基于性能的地震工程	53
规范是最低标准	53
公众的选择权	54
隔震建筑	59
基本概念	59
叠层橡胶隔震支座	64
摩擦摆型隔震支座	66
隔震在于细节	68
减震建筑	70
基本概念	70
防屈曲支撑	73
损伤机制控制	80
新技术的群众路线	84
简易隔震	84
减震木屋	86
城镇的恢复力	90
什么是恢复力	90
建筑损伤控制	97
焉能独善其身	103
3 走近地震——从汶川到芦山	109
从跪着的城镇到站立的废墟	109
砌体结构	116

构造柱和圈梁	118
预制板的是非	120
穿斗式木构架	124
非结构构件	128
灾后重建的中国速度	134
4 走近地震——史无前例的巨灾	140
妄言恢复力	140
海啸凶猛	143
巨震不倒?	148
晃动的新宿	154
不太一样的重建	159
5 地震带上的建筑梦想	163
现代主义的精神——辛德勒住宅 (1922)	164
结构美学——代代木国立体育馆 (1964)	167
新陈代谢运动——中银舱体 (1972)	170
城市的混沌——东工大百年纪念堂 (1987)	173
永恒的美——盖蒂中心 (1997)	176
竖向流动——仙台媒体中心 (2001)	179
畅游艺术海洋的大船——迪士尼音乐厅 (2003)	181
表里城市——单极东京	184
6 工程师不是什么	190
工程师不是科学家	190
工程师不是保守派	195
参考文献	202
后记	209

CONTENTS

1	INTRODUCTION TO EARTHQUAKE ENGINEERING	1
	A century's development	1
	Seismic coefficient method	1
	Response spectrum	3
	Nonlinearity	5
	Tall buildings	7
	Earthquake ground motions	8
	The measures of earthquakes	9
	Magnitude	10
	Intensity	13
	Precautionary intensity	17
	Earthquakes; the uncontrollable	20
	Expected earthquake hazard	20
	Earthquake forecast	22
	Earthquake early warning	25
	Structures; the controllable	29
	Experiments	31
	Analysis	37
	Codes for seismic design	39
	The US	40
	Japan	43
2	ADVANCES IN EARTHQUAKE ENGINEERING	49
	The nature of ductility	49

CONTENTS

Ductility-based seismic design	49
Divided perceptions of ductility	51
Performance-based earthquake engineering	53
Codes; the minimum requirement	53
Option of the public	54
Seismically isolated buildings	59
Basic ideas	59
Laminated rubber bearings	64
Friction pendulums	66
Isolation is in the details	68
Passive-controlled buildings	70
Basic ideas	70
Buckling restrained braces	73
Damage mechanism control	80
Low-cost seismic protection	84
Simple isolation	84
Dampers in wood houses	86
Community resilience	90
What is resilience?	90
Damage mitigation for buildings	97
The interdependencies	103
3 LEARNING FROM EARTHQUAKES: FROM	
WENCHUAN TO LUSHAN	109
From kneeling cities to standing ruins	109
Masonry structures	116
Confined masonry	118
Controversial precast slabs	120
Chuan-Dou timber frames	124

Nonstructural elements	128
China speed in post-quake reconstruction	134
4 LEARNING FROM EARTHQUAKES: AN	
UNPRECEDENTED CATASTROPHE	140
Resilience under way	140
Super tsunami	143
Collapse prevented?	148
Shaking Shinjuku	154
Reconstruction in a different manner	159
5 ARCHITECTURAL DREAMS ON THE RING OF	
FIRE	163
The spirit of modernism-the Schindler House	
(1922)	164
Structural aesthetics-the Yoyogi National Gymnasium	
(1964)	167
Metabolism-the Nakagin Capsule Tower (1972)	170
Chaos of cities-the Centennial Hall of Tokyo Tech	
(1987)	173
Eternal beauty-the Getty Center (1997)	176
Vertical flow-the Sendai Mediatique (2001)	179
Boat roaming in the art-the Walt Disney Concert Hall	
(2003)	181
Metropolitan context-Unipolar Tokyo	184
6 WHAT AN ENGINEER IS NOT	190
Not a scientist	190
Not a conservative	195
References	202
Postscript	209

1 地震工程初探

百年抗震

话说百年，总觉沉重。写在开篇，却有厚积而薄发之意。百年抗震发生了太多事情，这里只能挂一漏万，希望能大致描绘出地震工程的发展历程。

震度法

故事至少可以追溯到一百多年前。1906 年发生在美国旧金山的 M7.8 级地震造成至少三千人死亡。震后，年轻的日本工程师佐野利器（如图 1-1 所示）来到旧金山考察震害。回到日本后，佐野利器于 1914 年发表了《房屋抗震结构论》^[1]并取得博士学位。他在论文中提出了“震度法”，建议在结构设计中除了考虑竖向荷载之外，还应该考虑相当于 0.3 倍房屋自重的侧向力的作用。而在此之前，1908 年发生在意大利的 M7.5 级墨西拿地震夺走了超过 7 万人的生命，促使意大利开始将地震引起的水平惯性力简化为静力荷载对建筑结构进行抗震设计。这些都成为现代建筑抗震设计的起点。

给房子施加一个水平力，有点儿类似于把房子的一边抬起来，让它倾斜。比如要让房子承受相当于 0.3 倍自重的



图 1-1 佐野利器
(1880~1956)

水平力作用，可以像图 1-2 那样让它倾斜 17° 。这恐怕是人为地给房子施加水平力的最简便方法，因此至今仍有人采用这种方法测试结构模型抵抗水平作用的能力。他们只需要先在一个比较结实的平台上搭建模型，然后用千斤顶把平台的一边顶起来，让它倾斜一定的角度，看模型会不会垮掉。

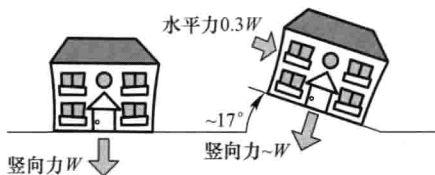


图 1-2 作用在建筑结构上的竖向力与水平力

日本建筑师和工程师们积极吸取 1906 年旧金山地震震害的教训，在推动日本建筑抗震发展方面做了大量的努力。这些努力在 1923 年日本关东大地震中得到了回报。 $M_L 7.9$ 级的关东大地震虽然造成将近十万人死亡，成为 20 世纪日本遭受的最严重的一次地震灾害，但在这次地震中，按照震度法设计的房屋的抗震性能得到了检验，抗震设计的必要性和有效性也得到了充分的验证。1924 年，日本颁布了新的建筑设计规范，正式提出在建筑结构设计应考虑相当于 0.1 倍重力加速度的地面水平加速度引起的惯性力作用^①。在 1925 年发生在美国 Santa Barbara 的 $M_L 6.8$ 级地震之后不久，美国 UBC 规范（Uniform Building Code）也开始采用震度法，规定在结构抗震设计中应考虑相当于 7.5%~10% 自重的水平地震作用。

^① 当时日本建筑设计规范采用容许应力法。材料的容许应力是材料强度的 1/3。地震是一种偶然荷载作用。如果允许在抗震设计中使用材料强度而非容许应力，则这里的 0.1 与佐野利器最初提出的 0.3 是一致的。