

# 建筑结构的震害规律与分析

——竖向地震作用与冲量原理

杨春田 牛春良 著



地震出版社

014057492

TU352.104  
70

# 建筑结构的震害规律与分析

——竖向地震作用与冲量原理

杨春田 牛春良 著



TU352.104  
70

地震出版社



北航

C1742213



北航

C1742213

### 图书在版编目 (CIP) 数据

建筑结构的震害规律与分析: 竖向地震作用与冲量原理/杨春田, 牛春良著. —北京: 地震出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-5028-4423-3

I. ①建… II. ①杨… ②牛… III. ①建筑结构—防震设计—研究 IV. ①TU352.104  
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 078961 号

地震版 XM3223

## 建筑结构的震害规律与分析——竖向地震作用与冲量原理

杨春田 牛春良 著

责任编辑: 刘晶海

责任校对: 孔景宽

---

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路9号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

专业部: 68467982 68721991

<http://www.dzpress.com.cn>

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 68455221

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

---

版(印)次: 2014年7月第一版 2014年7月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 275千字

印张: 11

书号: ISBN 978-7-5028-4423-3/TU(5113)

定价: 45.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

## 前 言

在编制国标《烟囱设计规范》(GB 50051)过程中,烟囱规范编制组有关同志,对竖向地震作用的计算方法,进行了近30年的研究。根据海城、唐山地震,积累了大量震害资料。分析烟囱的震害,发现有明显的规律性:即烟囱均为上部破坏或掉头,特别是砖烟囱,在地震烈度VI~VII度就有掉头发生。而在砖筒上加一个集中质量——砖筒水塔,其破坏规律就完全不同了。此时,破坏均发生在中下部,严重者在中下部塌落。分析这两种结构,直观上就可以看出:由于烟囱上部质量轻,才在上部发生破坏的。在震害中还发现:有的烟囱上部折断以后,竟横落在烟囱上面,说明烟囱上部有上抛现象,需要在计算理论方面,寻求更合理的计算方法。

唐山地震时,石块、木头以及人被抛起2m多高,停在芦台车站的车厢掉下轨道,变压器也掉下轨道。而唐山地震并未发现竖向地震加速度大于重力加速度,那么,自由物体为什么会被抛起呢?这些现象均说明:竖向地震作用,是一种冲击作用。

分析这些现象及结构震害现象以后,我们认为:计算竖向地震作用,采用冲量原理,能够更好地解释震害破坏规律。

1989年,我们在《特种结构》上,发表了《烟囱在竖向地震作用下计算方法的探讨》一文,这是采用冲量原理发表的第一篇论文。

1995年1月,又发生了日本阪神7.2级地震,在神户市造成多座中高层建筑中间某一层坍塌。浅埋式地铁工程,柱子崩塌,地面塌陷,再次证明竖向地震作用对震害的巨大作用。如果不能正确地考虑和计算竖向地震作用,就无法保证“大震不倒”。

在此背景下,1997年7月,原冶金工业部建设司和建设部标准司,对我们的研究成果,在大连进行了专家评审。评审结论是:“采用冲量原理计算竖向地震作用,概念清晰,公式简捷实用,是工程抗震理论上的一项创新。该项研究成果达到了国际先进水平。”

为了使研究成果更符合客观实际,《烟囱设计规范》主编单位中冶东方工程技术有限公司(原包头钢铁设计研究总院)委托大连理工大学做了两个烟囱模型试验。试验证明:采用冲量原理计算竖向地震作用是合理的。因此,《烟囱设计规范》(GB 50051—2002)将这一研究成果,纳入了规范。本书已将试验报告全文编入,供读者研究。

笔者编写此书的目的，就是介绍多年来的研究成果，并通过实际震害进行理论分析，其中包括的结构有：多层建筑、大跨度厂房、烟囱、水塔等特种结构。通过对实际震害的分析，可以进一步看出：在强烈地震作用下，正确的考虑竖向地震效应，对提高抗震设计水平非常重要。否则，难以保证“大震不倒”。

于翔博士和钱七虎院士等（2001），在分析日本阪神地震地铁的震害时写道：“1995年日本阪神地震中，地铁工程结构发生前所未有的破坏，其中柱的破坏尤为严重。人们通常认为是由水平地震作用引起的。但地铁结构的有些震害现象至今无法得到圆满的解释。采用冲量理论分析竖向地震力对地铁结构中柱破坏的影响，能较好地解释中柱破坏的震害现象。”这是笔者首次看到资深学者，采用冲量理论计算竖向地震力的文献。相信有更多的学者，会逐渐接受在强烈地震作用下，采用冲量理论计算竖向地震作用是符合实际情况的。通过冲量理论计算的竖向地震与水平地震共同作用，可以更好地解释震害特征和破坏规律。

在此说明：由于本书主要分析20世纪中后期的震害，所以，地震的有关参数，均采用《建筑抗震设计规范》（GBJ 11—89）的数值，以便于计算对比。

本书初稿由杨春田完成，经牛春良副总工程师校核、补充、完善。

在编写中，得到我单位有关领导和部门的支持。鞠建英女士对本书给予一贯关注。在此，一并表示感谢。

于淑琴高级工程师曾参加本课题的研究工作，后因工作分工关系，未能参加编写。本书插图由祁妮同志完成。

杨春田

中冶东方工程技术有限公司

2014年3月

# 目 录

<b>第1章 概 论</b> .....	1
1.1 地震的一些基本概念 .....	1
1.2 关于竖向地震作用 .....	5
1.3 采用冲量原理计算竖向地震作用.....	11
<b>第2章 采用冲量原理计算竖向地震作用的公式</b> .....	21
2.1 震害特征的启示 .....	21
2.2 烟囱的竖向地震作用计算公式.....	21
2.3 多层建筑的竖向地震作用计算公式.....	30
2.4 单层工业厂房竖向地震作用的计算公式.....	36
2.5 对竖向刚度突变截面的振动效应分析.....	38
2.6 地震时自由物体的上抛现象分析.....	40
<b>第3章 竖向地震响应的试验</b> .....	44
3.1 烟囱竖向地震响应模型试验.....	44
3.2 上海东方明珠电视塔模型抗震试验.....	93
<b>第4章 多层及高层建筑震害分析</b> .....	96
4.1 概述.....	96
4.2 砖混结构.....	97
4.3 多层框架结构.....	99
<b>第5章 大跨度结构的震害</b> .....	112
5.1 单跨混凝土厂房 .....	112
5.2 单跨砖柱厂房 .....	126
<b>第6章 特种结构的震害</b> .....	128
6.1 烟囱 .....	128
6.2 水塔 .....	135
6.3 高位料仓 .....	141
6.4 地铁工程 .....	145

6.5 高架公路桥 .....	148
6.6 台湾集集镇武昌宫 .....	153
<b>第7章 对抗震工程的建议</b> .....	<b>156</b>
7.1 关于基础工程的整体性 .....	156
7.2 关于框架结构 .....	158
7.3 钢筋混凝土厂房 .....	159
7.4 特种结构 .....	165
<b>参考文献</b> .....	<b>167</b>

# 第1章 概 论

## 1.1 地震的一些基本概念

### 1.1.1 地震

地震是指因地球内部缓慢积累的能量突然释放而引起的地球表层的振动。地震通常按照其成因可划分为三种类型：构造地震、火山地震和陷落地震。

由于地壳运动产生的自然力推挤地壳岩层使其薄弱部位突然发生断裂错动，这种在构造变动中引起的地震叫结构地震。据统计，构造地震约占世界地震总数的90%以上。

由于火山爆发，岩浆猛烈冲出地面时引起的地面振动叫火山地震，这类地震只占全世界地震的7%左右。1914年日本樱岛火山爆发，产生的振动相当于一个6.7级地震。

由于地表或地下岩层因某种原因突然造成大规模陷落和崩塌时导致小范围内的振动叫陷落地震。

### 1.1.2 地震波

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播，称为地震波。地震波是一种弹性波，它包含可以通过地球本体的两种“体波”和只限于在地面附近传播的两种面波。

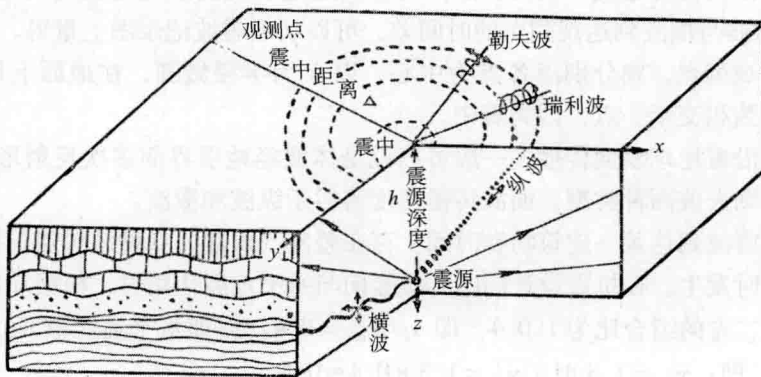


图 1-1 地震波传播与运动形式示意图 (一)

体波包含“纵波（也称P波）”与“横波（也称S波）”两种。纵波是由震源向外传播的压缩波，质点的振动方向与波的前进方向一致，其特点是周期短、振幅较小。横波是由震



源向外传播的剪切波，质点的振动方向与前进方向垂直，特点为周期长、振幅较大。纵波传播速度约是横波传播速度的 1.67 倍。

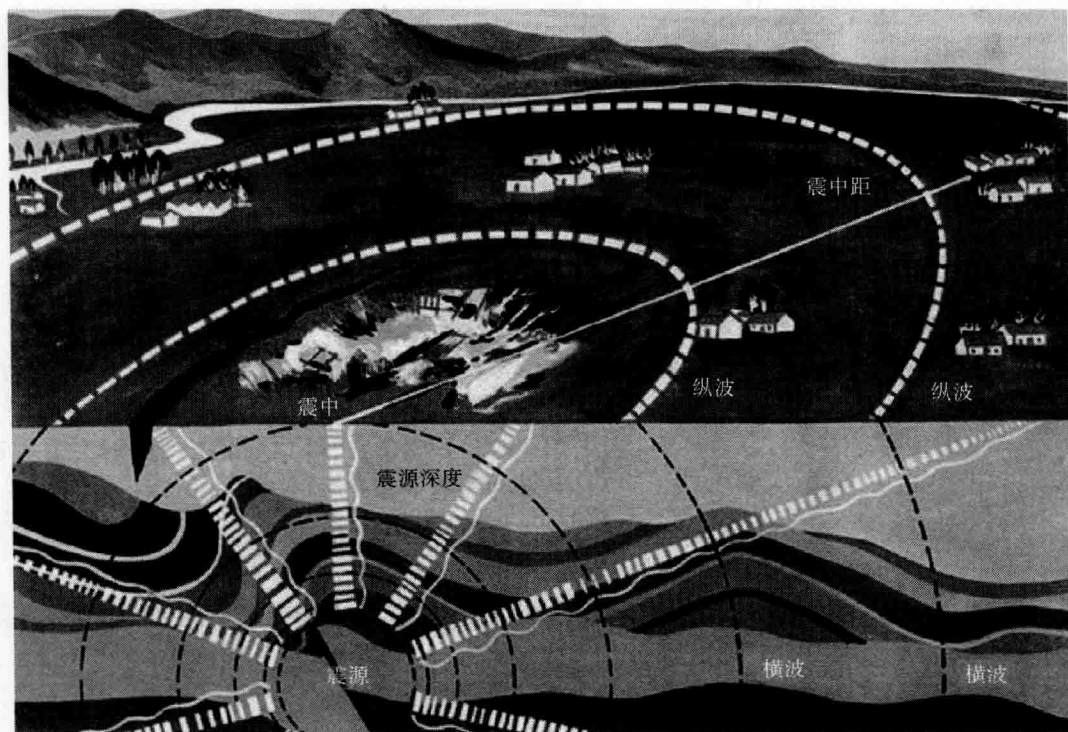


图 1-2 地震波传播与运动形式示意图 (二)

利用纵波与横波传播速度不同的特点，可以确定地震观测点距离震源的距离约为： $S = 8t$  (km)， $t$  为纵波与横波到达观测点的时间差，可以从地震波记录图上量得。

如果有三个观测点，则分别以各点为中心，以  $R$  为半径做圆，在地面上每两个相交点可做一条弦，三弦相交于一点，即为震中。

面波只限于沿着地球表面传播，一般可以说是体波经地层界面多次反射形成的次生波，它包含瑞利波和勒夫波两种类型。面波传播速度落后于纵波和横波。

由于各种地震波到达某一建筑物在时间上存在差异，因此，各种波对建筑物所产生的最大反应也不是同时发生。在抗震设计同时考虑竖向与水平地震作用时，根据加速度峰值记录 and 反应谱分析，二者的组合比为 1:0.4，即  $a_v/a_{max} = 0.4$ ，亦即水平地震取  $\alpha_{maxh}$  时，竖向地震  $\alpha_v = 0.4\alpha_{maxv}$ ，即： $\gamma_{Eh} = 1.3$  时， $\gamma_{Ev} = 1.3 \times 0.4 \approx 0.5$ 。

### 1.1.3 地震反应谱与设计反应谱

地震对建筑物的破坏作用主要是由于地震波在土层中传播引起强烈的地面运动所造成的。这种地面运动使地基基础发生变形，上部结构发生振动，当结构的振动超过它的许可限度时就造成破坏甚至倒塌。为了抗御地震的破坏作用，需要了解建筑物在地震作用下的

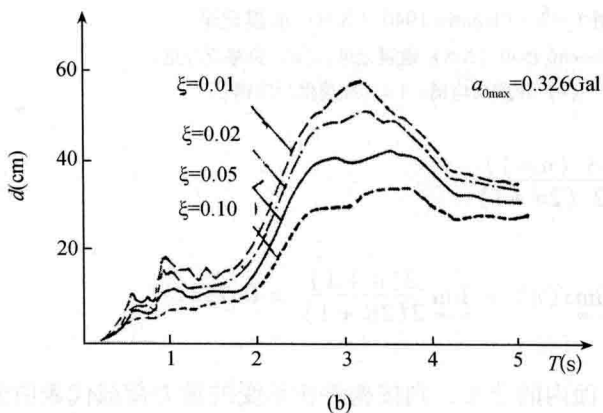
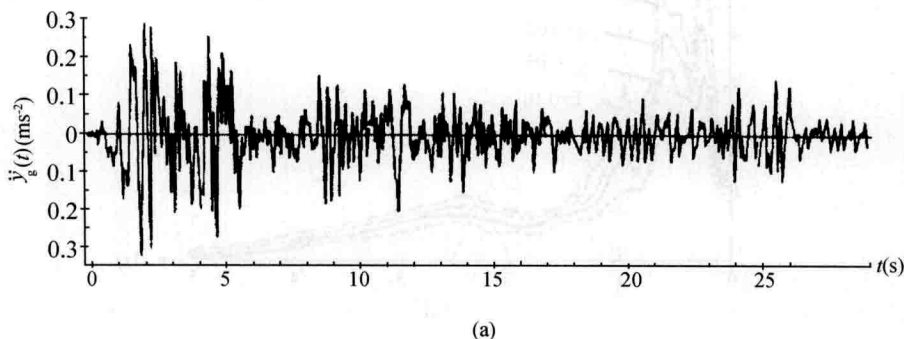
反应。

在抗震设计中最关心的是最大反应，当阻尼给定时，对于不同的自振周期的单质点体系的最大位移反应，可以通过相对位移反应谱直接查出。单自由度体系在给定的地震作用下某个最大反应与体系自振周期的关系曲线称为该反应的地震反应谱。如果已知相对位移最大反应，相应的应力状态也就可以计算出来了。但是，在结构抗震设计中更广泛采用的是地震荷载概念，即通过荷载来计算内力和选择截面。这相对位移谱就显得不够用了，因此，还需要速度和加速度反应谱。图 1-3 是 Elcentro 1940 (N-S) 地震记录。

地震对建筑物的作用可以用反应谱来表示，但由于不能准确预估地面加速度记录，因此，只能将过去已经记录到的强震记录主要特性和影响因素加以研究，总结并给出供工程设计使用的“标准地震反应谱”，也就是我们抗震设计规范给出的地震影响系数曲线。

结构设计要分别进行水平地震作用和竖向地震作用计算，本书主要讨论竖向地震作用。现行《建筑抗震设计规范》对以竖向反应谱为基础的竖向地震作用采用简化计算方法，原则上类似于水平地震作用的底部剪力法：

- (1) 以竖向第一振型反应为主；
- (2) 第一振型为线性倒三角形分布；



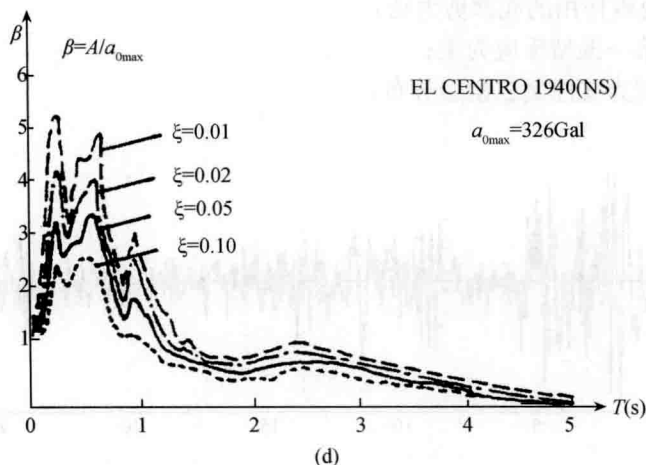
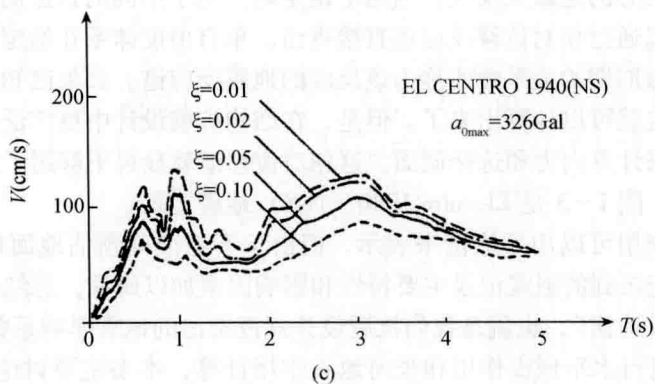


图 1-3 Elcentro 1940 (N-S) 地震记录

(a) Elcentro 1940 (N-S) 地震记录; (b) 位移反应谱;  
(c) 速度反应谱; (d) 加速度反应谱

(3) 等效重力系数取  $x = \frac{3(n+1)}{2(2n+1)}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{3(n+1)}{2(2n+1)} = 0.75$$

(4) 竖向地震力在楼层平面内的分布, 则按构件所承受的重力荷载代表值分配。  
本书采用以冲量原理为基础的竖向地震作用计算理论。

## 1.2 关于竖向地震作用

世界各国抗震设计的目标是基本一致的：“小震不坏，中震可修，大震不倒”。但是为实现这一目标，还有许多课题需要研究。目前，最大的课题，就是还没有解决“大震不倒”的问题。我国《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）是采用“小震”的地震加速度，按弹性结构计算地震效应。并采取构造措施保证结构延性，使之具有“中震”（基本烈度）相应的变形能力。当基本烈度发生时，允许结构达到或超过屈服极限，产生塑性变形，依靠结构的塑性耗能能力，使结构得以保持稳定，经过修复，建筑结构仍可继续使用，故称之为“中震可修”。除上述计算外，对特别复杂或重要结构，还应对薄弱部位进行塑性变形验算，并采取措施提高薄弱部位的承载能力或变形能力，使薄弱部位的塑性水平变位不超过允许的变位，防止结构倒塌，实现“大震不倒”。

“大震”也称“罕遇地震”，一旦这种情况发生，人们往往认为产生震害不可避免。

近30年来，在世界范围内，发生多起破坏性强烈地震。这些地震给抗震工程界提供了丰富的震害资料，分析这些震害资料，使我们逐步认识到：所有大震产生的震害，都是由水平地震和竖向地震共同作用造成的。大震发生时，相应的竖向加速度也很大。因此，竖向地震作用，对震害的影响就不可忽视。如果不能正确的考虑竖向地震作用，许多结构的破坏特征，就不能得到恰当的解释，震害就会出现许多意外现象：不该坏的，坏了。不该倒的，倒了。

现在的问题是，有些结构已经考虑了竖向地震作用，如高层建筑、高耸结构等，也都给出了竖向地震作用效应的计算方法，但并未解决“大震不倒”的问题。

### 1.2.1 竖向地震加速度的取值

早在20世纪70年代，我国的《工业与民用建筑抗震设计规范》（TJ 11—78），就给出了有关结构的竖向地震系数 $\alpha_v$ ，Ⅷ度时 $\alpha_v = \pm 0.1$ ；Ⅸ度时 $\alpha_v = \pm 0.2$ 。这与原苏联抗震规范取值是相同的，其中 $\alpha_v$ 沿结构高度为定值，不随结构高度变化。

这样考虑竖向地震作用效应的结果，发现几乎对震害没有多大影响。

对水平构件而言，增加10%~20%的自重，影响不大。对竖向构件而言，由于结构承载潜力很大，对承载能力影响更是微不足道。

正是由于这种定量取值和计算，一直给人们一个很深的印象：震害主要是由水平地震作用造成的，竖向地震作用影响不大，这已形成一种固有的概念。

根据刘大海等（1987）介绍：美国和原苏联，都曾实测到较大的竖向加速度值，并列举了几个典型实例。最突出的是1979年美国山谷地震，所获得的30个记录， $\alpha_v/\alpha_H$ 的平均值达1.12，最大的一个记录，竖向最大加速度达到1.75g，其 $\alpha_v/\alpha_H = 2.4$ 。1976年原苏联格兹里地震，记录到的最大竖向加速度为1.39g， $\alpha_v/\alpha_H = 1.63$ 。

以上，均作为个别例子，一般都作为例外，均未列入规范。目前在规范中，一般取 $\alpha_v/\alpha_H = \frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}$ 。本书为分析震害，即取 $\alpha_v/\alpha_H = 0.65$ 。

我国历届建筑抗震设计规范，对竖向地震作用，都曾做过具体规定。我们在本书中主要

分析 20 世纪后期的震害。因此，关于地震加速度的取值，以《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89) 为准。

### 1.2.2 发生在 20 世纪的几次大地震

近 30 年来，在世界范围内，发生多次强烈地震，都造成了严重震害。这些震害给抗震工程工作者提出了许多值得研究的课题。这些地震包括：

(1) 1973 年海城地震。这次地震由于首先是小震不断，于是及时做出了强震预报，才未造成太大的人员伤亡。由于震级为 7.3 级，最大烈度达到 IX 度，对建筑结构造成了严重的震害。

(2) 1976 年唐山地震。这次地震震级为  $M_L 7.8$ ，造成惨重的人员伤亡。图 1-4 为一震后工厂厂区。



图 1-4 震后厂区场景

图 1-5 和图 1-6 分别为唐山市河北省矿业学院图书馆和唐山地区交通局，均为唐山地震重点保护遗迹。矿业学院图书馆为三层高的阅览室，系装配式纯框架结构，西头倒毁，东头框架幸存。唐山地区交通局为砖混结构，三层办公楼遭到破坏。

人们应从这次地震吸取什么教训呢？有哪些经验可以吸取呢？

唐山地震 10 周年时，一位地震时正在唐山的地震工作者，为了追忆唐山地震，激励人们去总结经验和教训，曾写了一本《唐山地震之谜》，写出了他的亲身感受。书中在“地震奇观”中描述到“首先到达地表的快速地震波（通称纵波，代号为 P），产生逆冲式上下颠簸，发出咚咚响声，人如坐快速升起的电梯似的。人和物均被上抛至空中，并形成短时间的

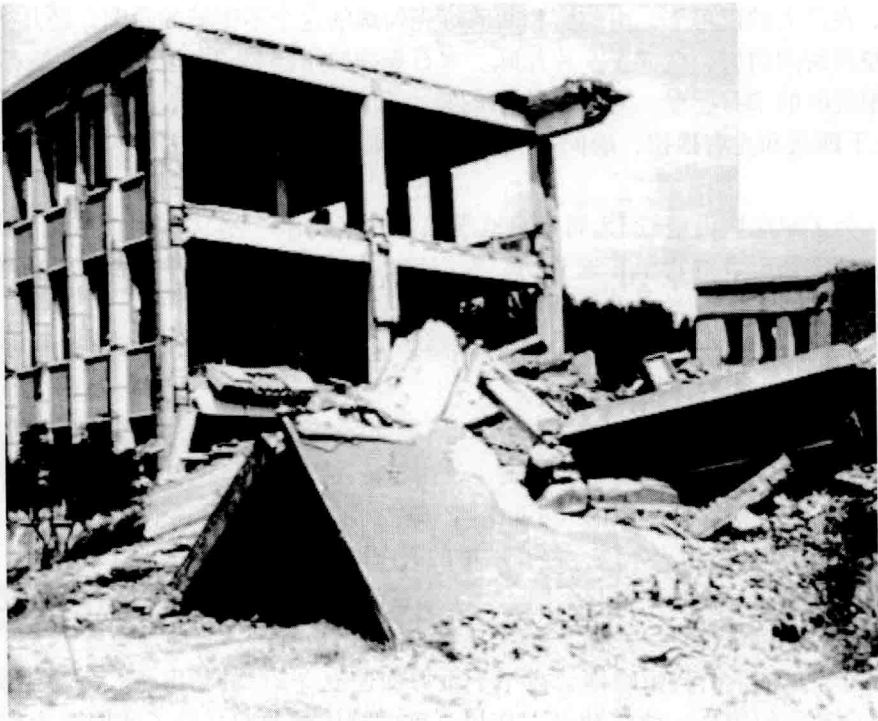


图 1-5 矿业学院图书馆



图 1-6 唐山地区交通局

失重状态。在巨大的夜幕下，由疏密相间的灯光勾画的这个不夜城的轮廓，经几个上下颠簸和左右推拉就瞬间消失，变成了一片瓦砾。木石等物被抛起2m以上，在空中飘舞。

这种地震时的亲身感受，对地震作用的特点和能量的释放，对分析震害很有好处。从“经几个上下颠簸和左右推拉，瞬间就变成一片瓦砾”，可见竖向地震作用效应，是绝不可忽视的。

同样，为了纪念唐山地震15周年，地震出版社又出版一本《唐山地震奇事录》，该书作者对唐山地震亲历者进行了普遍采访。专门搜集地震时人们的切身感受。看过这本书发现，书中所讲的“奇事”均与竖向地震作用有关，现举几例：

“一户住在三层楼的人家，地震时正在熟睡。地震将屋顶掀掉了，他家的床也被抛出屋外，落在地上时，人扔在床上”。

另一个典型例子：“一户人家住在平房。地震前，家人在院子里晾着衣服。当地震快发生时，天空中亮光闪闪，家人以为要下雨，就让年轻人去院子里拣衣服。刚到院子里，地震发生了，只听隆隆巨响，拣衣服的人不知不觉被抛到了3m高的房顶上”。

“在距唐山不远的芦台火车站，停在站里的火车跳下铁轨”。

有关的实例很多，在此举这几个例子，主要目的在于：我们从这些事件中，受到不少启发，感受到竖向地震作用是一种脉冲作用。因为，唐山地震时，竖向加速度不大于重力加速度。那么为什么地面上的自由物体会在小于重力加速度（g）的情况下，发生上抛现象呢？这说明：竖向地震作用是一种“冲击”作用。自由物体被抛起，给了我们一个启发。而联想到建筑物的震害，也应反映这一现象。于是，笔者开始采用“冲量原理”分析由竖向地震作用引起的震害及其特点。并结合编制国标《烟囱设计规范》，采用冲量原理，分析各类结构的震害，均得到满意的结果。

(3) 1985年墨西哥地震。这次地震距墨西哥城很远，场地卓越周期很长，对墨西哥城造成的震害相当严重，使一些10层以上的多层建筑，在4~8层范围内破坏较重。其中还有一种令人费解的震害现象：多层的钢筋混凝土框架结构，层间柱头的震害，要比相应的层间柱脚的震害重得多。在人们以往的观念中，似乎应当柱脚的震害比柱头的震害重，才好解释。因为柱脚处的弯矩比柱头处的弯矩大，实际震害是柱头重于柱脚。

(4) 1990年发生在菲律宾的大地震，在地震烈度Ⅹ度区的碧遥市，一座6层的内华达饭店，2层和3层叠落在一起，首层和4层以上，完好无损。

当地人将这种震害称之为“三明治”，俗称夹肉饼。抢救被压在楼内的人，需要从首层顶楼板和4层底板打洞，才能救出2层和3层的人。

这是自1962年以来，第二次发现中间层坍塌的实例。1962年曾在南斯拉夫地震中，烈度Ⅹ度区一座4层建筑在2层坍塌，首层和3层以上完好无损。

(5) 1994年美国洛杉矶发生6.7级地震，造成加州高速公路干线中断，建筑严重破坏，经济损失达170亿美元，令美国人感到震惊。美国在科学技术方面，是比较发达的，但在工程抗震方面，也远没有过关。

(6) 1995年1月，发生在日本阪神地区的7.2级地震，造成经济损失达1000亿美元，人员伤亡惨重。

这次地震为“都市直下型”地震，震中烈度为Ⅶ度（日本地震烈度，相当于中国地震

烈度Ⅹ度),造成日本一些多层建筑在中间层坍塌,而下部和上部各层完好无损(图1-7),这使日本地震工程界感到意外和震惊。日本的地铁工程也遭到严重破坏,于翔博士、钱七虎院士等(2001)曾分析产生震害的原因,认为:“采用冲量理论分析竖向地震力对地铁结构中柱破坏的影响,能较好的解释中柱破坏的震害现象”。



图1-7 阪神地震中间层破坏

(7) 1999年7月发生在土耳其的7.4级地震,建筑物破坏严重,造成1.5万人丧生,2万人受伤。

土耳其是个多地震国家,每发生一次强烈地震,就修改一次《抗震规范》。但其规范均以水平加速度为标准,没有提到竖向加速度。实际上,这次地震,正发生在断裂带附近,地面产生了严重的水平错动和垂直方向的错动。在这种情况下,仍不考虑垂直方向的地震作用,怎能保证建筑不跨塌呢?值得深思。

(8) 1999年9月21日,发生在中国台湾省的7.6级大地震(简称台湾“9·21”大地



震), 造成 2045 人死亡, 11306 人受伤, 倒塌和半倒塌的房屋 10 万余间。这次地震使一些多层建筑, 在中下部被压缩, 但房屋并未倒, 仍斜立着。

台湾地区的“抗震规范”, 也是不考虑竖向地震作用的。地震发生后, 台湾《中国时报》发表署名文章《建筑结构观念, 亟待更新补救》。

文章说: “目前建筑结构设计的承载力及耐震方面, 一般考虑垂直向下载重及水平横向的地震力, 但本次‘9·21’地震因震中极近地表, 故地震所产生的主要破坏来自于垂直上下的跳动。”文章还介绍了钢筋混凝土柱子, 在上下跳动后, 已经变形断裂。此时柱子的结构已经破坏到几乎不能承受任何方向的受力。建筑物在失去支承能力的情况下应声倒地。该文还根据震害的直观现象指出: “特别是柱头部分, 因承载的建筑物重量最大, 所产生的震害也最严重。”

文章还谈到: “几年前的日本阪神大地震已使台湾的地震界产生警惕, 特别针对建筑物的耐震能力修订并订立法规。只是这些补正的措施是否真的适合台湾的地震形态? 这次地震正是一个很好的印证和检讨的机会。”

实际上, 阪神地震时竖向地震效应, 已反映的十分充分。唯独日本地震工程界, 对竖向地震效应, 并无充分认识。因为, 按一般的竖向地震作用计算对震害影响不大, 故一直未能引起重视。

近 30 年来, 这些地震造成的震害, 一再提醒地震工程界: 要关注竖向地震作用对震害的影响, 改进竖向地震作用的计算方法, 是解决“大震不倒”的关键问题之一(图 1-8 房屋整体倾斜, 二楼成了一楼)。



图 1-8 一楼消失

关于竖向地震作用的方法, 早在 20 世纪 80 年代, 笔者就曾发表文章, 首先从烟囱的震害规律和特点, 认为采用冲量原理计算竖向地震作用较为合理。并结合参加编制国家标准《烟囱设计规范》(GB 50051—2002), 进一步研究采用冲量原理计算竖向地震作用。本书将有关研究成果, 汇集成此书。作为抛砖引玉, 期望会引起关于竖向地震作用方面的重视。