

Collapse Mechanism of RC Frame Structures
Suffered from Strong Earthquake

钢筋混凝土框架结构 地震倒塌机理

郭迅 著

中国建筑工程工业出版社

非外借

钢筋混凝土框架结构 地震倒塌机理

郭迅 著

中国地质出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

钢筋混凝土框架结构地震倒塌机理/郭迅著. —北京: 中国建筑工程出版社, 2018.3
ISBN 978-7-112-21672-7

I. ①钢… II. ①郭… III. ①钢筋混凝土框架-
框架结构-抗震性能-研究 IV. ①TU375.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 319375 号

多层钢筋混凝土 (RC) 框架结构广泛用于学校、医院和办公建筑中, 近年发生的多次破坏性地震中, 许多 RC 框架结构发生粉碎性倒塌, 造成大量人员伤亡。本书从 2008 年汶川地震中位于震中的漩口中学的震害入手, 以探讨构造相同的单面外走廊多层框架教学楼全部倒塌, 而相邻的内走廊多层框架办公楼不倒塌的原因为目标, 通过现场调查、理论分析和地震模拟试验等综合手段, 阐述了单面外走廊多层框架结构的倒塌机理。指出窗下半高连续填充墙约束柱的纵向变形, 而走廊一侧柱不受约束, 导致受约束柱的内力高度集中, 出现“凝震聚力”现象, 从而率先破坏, 以致整体倒塌。试验还揭示了框架结构中梁上填充墙约束梁的变形, 使弱梁不弱, 致使“强柱弱梁”的设计意图难以实现, 这一结果与几乎全部实际震害相吻合。

本书图文并茂, 叙述深入浅出, 形象地展示了框架结构地震作用下的力学行为和倒塌机理。可供相关高等院校师生以及科研、设计单位的技术人员参考。

责任编辑: 刘婷婷 刘瑞霞

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐

钢筋混凝土框架结构地震倒塌机理

郭迅 著

*

中国建筑工程出版社出版、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

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 6 字数: 145 千字

2018 年 2 月第一版 2018 年 2 月第一次印刷

定价: 70.00 元

ISBN 978-7-112-21672-7
(31534)

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)

前 言

钢筋混凝土(RC)框架结构广泛应用于学校、医院、办公楼和住宅建筑中,地震时这类结构倒塌造成的人员伤亡触目惊心。在设计中,框架结构要满足“强柱弱梁”原则以避免倒塌,但是大量的实际震害表明“强柱弱梁”难以实现。2008年汶川地震中,位于震中映秀镇的漩口中学有3栋构造相似的单面外走廊多层框架结构教学楼发生模式相近的倒塌,而相邻的内走廊多层框架教学楼没有倒塌。本书以解释这一现象为出发点,通过现场调查、理论分析和地震模拟实验,探讨多层RC框架结构的地震倒塌机理,得到如下几点新认识。

1. 窗下半高连续填充墙对窗间柱的约束作用导致柱侧向刚度比无约束的走廊柱高出几倍,结构在纵向有显著的偏心;而横向受满砌填充墙的约束难以变形,结构并不发生扭转,各层楼板仅沿纵向发生平动;假定窗间柱被半高墙约束,则其获得相当于走廊柱8倍的地震剪力和4倍的弯矩,这样窗间柱上下端率先破坏形成塑性铰。

2. 楼板在纵向往复运动过程中,窗间柱的相对层间位移角相当于走廊柱的两倍,因 $P-\Delta$ 效应而率先丧失承重能力(倾倒或压溃),继而引发结构整体倒塌。这样的倒塌模式可以概括为“凝震聚力、个个击破”。

3. 框架梁上的填充墙(无论半高或全高)对梁的竖向变形有很强的约束作用,实际上墙和梁组成了一个整体构件在工作,这样的“组合梁”相当于给柱端提供一个固端约束,“弱梁不弱”,柱端出现塑性铰是很自然的。这就解释了为什么在实际震害中难以见到“梁铰”而处处是“柱铰”。

研究过程中还获得了有关多层RC框架结构地震作用下力学行为的若干启示。窗下填充墙在结构实际内力分配中发挥着决定性作用,成为触发结构发生“凝震聚力、个个击破”式倒塌的关键因素。结构倒塌一般始于底层,底层的柱并非同步受损,相当于被地震动“蚕食”,逐个或分批失效。结构内力分析应考虑砌筑纵横向填充墙后的空间整体效应。比如按照二维分析时,满砌的横向填充墙对结构扭转的约束作用就无法体现,这样,各层楼板的纵向平动模式就不能展现出来。

本书由郭迅总体负责,王波撰写了第4、5章,宣越撰写了第3、6章,袁新星撰写了第7章。相关的研究工作始于2008年汶川地震之后,我的博士生杨伟松、黄思凝、刘红彪、梁永朵、周洋和硕士生袁星、武占鑫、何雄科都作出了重要贡献。

感谢国家自然科学基金(项目编号:51478117)的资助。

郭迅

2017年11月

目 录

第 1 章	绪论	1
第 2 章	多层 RC 框架结构震害特征分析	6
2.1	填充墙破坏	6
2.2	框架节点破坏	7
2.3	短柱破坏	8
2.4	层倒塌	9
2.5	整体倒塌	10
第 3 章	多层 RC 框架模型设计与制作	11
3.1	模型设计	11
3.2	模型相似设计	13
3.3	模型材料性能试验	14
3.4	模型制作	16
第 4 章	结构模型模态测试	20
4.1	基本理论	20
4.2	传感器及数据采集设备	20
4.3	试验工况	22
4.4	脉动测试结果	22
4.5	敲击测试结果 (模态)	26
4.6	敲击测试结果 (应变响应)	28
第 5 章	地震模拟试验	41
5.1	加载设备	41
5.2	传感器布置	42
5.3	振动台试验加载工况	43
5.4	输入 0.3g 时试验结果	43
5.5	倒塌试验	53
第 6 章	RC 框架结构倒塌临界状态分析	60
6.1	底层柱内力计算 (输入 0.3g)	60
6.2	结构倒塌临界方程的推导	67
第 7 章	“强柱弱梁”问题的探讨	70
7.1	实验模型	71
7.2	地震输入及结构响应	74
第 8 章	实际震害剖析	79
8.1	北川消防支队 RC 框架结构	81

8.2 北川盐务局宿舍..... 82

8.3 映秀电力仓库..... 83

8.4 漩口中学办公楼..... 84

8.5 无填充墙的 RC 框架结构——禹荷大酒店 85

第 9 章 总结 86

参考文献 87

第 1 章

绪论

我国地震灾害十分严重,具体表现为小震致灾、中震大灾、大震巨灾。而房屋倒塌是地震造成人员伤亡和财产损失的最主要原因。提高房屋结构的抗倒塌能力是减轻地震灾害的最主要途径。“倒”是指竖向构件,比如柱、墙倾覆;“塌”是指水平构件,比如梁、板坠落。“倒”是因,“塌”是果,研究倒塌机理,关键在于查找竖向构件失效的原因。多层钢筋混凝土(RC)框架结构在我国应用十分普遍,历次破坏性地震中倒塌数量相当多,造成众多人员伤亡。国内外学者对这种结构的研究投入了大量的精力。T. Paulay 提出多数 RC 框架结构的倒塌模式都可归因于图 1.1 (a)、(b) 所示的“层屈服机制”。该图显示,对于相同的最大屋顶侧移 Δ ,“梁铰机制”对应的层间位移角远小于“柱铰机制”对应的层间位移角,因而对塑性铰的延性要求就没有那么苛刻。柱铰机制通常对应软弱底层,即使柱上、下端塑性铰区的构造措施再完善,也很难满足延性要求,据此提出应尽量避免柱铰机制的出现。清华大学的林旭川、叶列平等对汶川地震中的 RC 框架结构进行有限元仿真分析,认为按照规范设计的框架结构无法满足“强柱弱梁”的要求。马玉虎、陆新征等认为楼板作用和基础转动作用对框架结构的破坏模式有较大影响。Elwood 对一个单层两跨平面框架结构进行了振动台倒塌试验,并分析了中柱失效后的内力重分布情况。Wu 对一个单层三跨剪切型平面框架结构进行了倒塌试验研究,模拟了框架柱从开始损伤至完全丧失承重能力而倒塌的全过程。黄思凝和郭迅等设计了相似比为 1:4 的两层外廊式框架结构模型,并用振动台进行倒塌试验,提出在倾覆弯矩引起的附加轴力作用下,外廊式框架单柱侧的总轴压比升高,延性显著降低,柱端塑性铰区出现压剪破坏是引起外廊式框架倒塌的主要原因。金焕和戴君武等设计制作了 3 个缩尺比为 1:2 的考虑楼板翼缘及填充墙作用的单层不等跨框架模型,研究表明现浇楼板的存在是结构产生“强梁弱柱”式破坏机制的重要原因,当填充墙存在时,外廊柱的存在加重了中柱的破坏程度。杨伟松、郭迅等进行了一个相似比为 1:4 的三层 RC 框架结构振动台试验,研究了结构模型地震响应规律、宏观破坏模式。依据各关键测点的实测数据和倒塌过程,指出受窗下墙约束的柱率先失效而触发结构倒塌。同济大学的黄庆华和顾祥林进行的 RC 框架结构振动台倒塌试验显示模型发生了始于底层的“强梁弱柱”型倒塌。

在地震作用下,框架底层柱承担的竖向和水平向荷载最大,柱上、下端出现塑性铰后,该层变成几何可变体系,因无法承重而倒塌,以致出现图 1.1 (a) 所示的经典“层屈服机制”。若中间存在薄弱层,也可能出现图 1.1 (b) 所示的模式。为避免“层屈服”模式的出现,各国抗震设计规范均采用“强柱弱梁”的设计准则,期望出现如图 1.1 (c) 和图 1.1 (d) 所示的“梁铰屈服机制”。若塑性铰出现在梁端,既能消耗地震能量,又能保证柱的相对完整性,这样能最大限度地保证柱的竖向承载能力,从而避免结构因承重失效而发生倒塌。在我国现行的抗震设计规范中,具体做法是提高柱端设计弯矩值,即:

$$\sum M_c = \eta_c \sum M_b \quad (1.1)$$

式中: $\sum M_c$ ——节点上下柱端截面顺时针或逆时针方向组合的弯矩设计值之和;

$\sum M_b$ ——节点左右梁端截面逆时针或顺时针方向组合的弯矩设计值之和;

η_c ——框架柱端弯矩增大系数;对框架结构,一、二、三、四级可分别取 1.7、1.5、1.3、1.2;其他结构类型中的框架,一级可取 1.4,二级可取 1.2,三、四级可取 1.1。

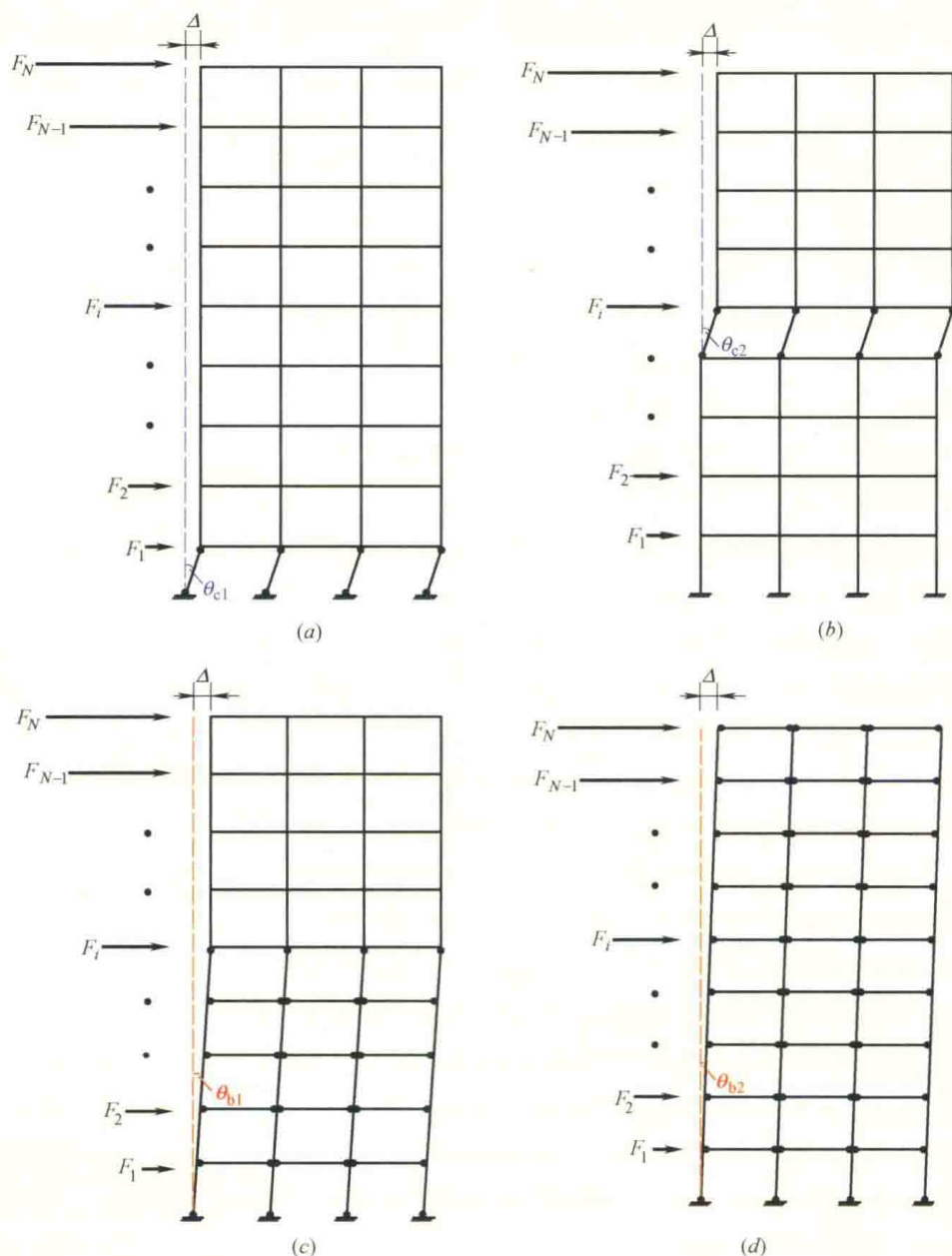


图 1.1 经典的 RC 框架地震倒塌机制

(a) 底层屈服机制; (b) 中间层屈服机制; (c) 部分楼层梁铰机制; (d) 全部楼层梁铰机制

如果不考虑填充墙的作用,“层屈服机制”是正确的,然而实际震害所表现出的破坏或倒塌模式只有极少数能够用“层屈服机制”来解释。比如位于都江堰市底层空旷的临湖别墅,在 2008 年 5 月 12 日汶川地震中遭遇了如照片 1.1 所示的破坏。照片 1.2 和照片 1.3 分别展示了 1971 年美国 San Fernando 地震和 1990 年菲律宾地震中结构底层的破坏。



(a)



(b)

照片 1.1 都江堰临湖别墅底层破坏

(a) 整体结构；(b) 局部破坏



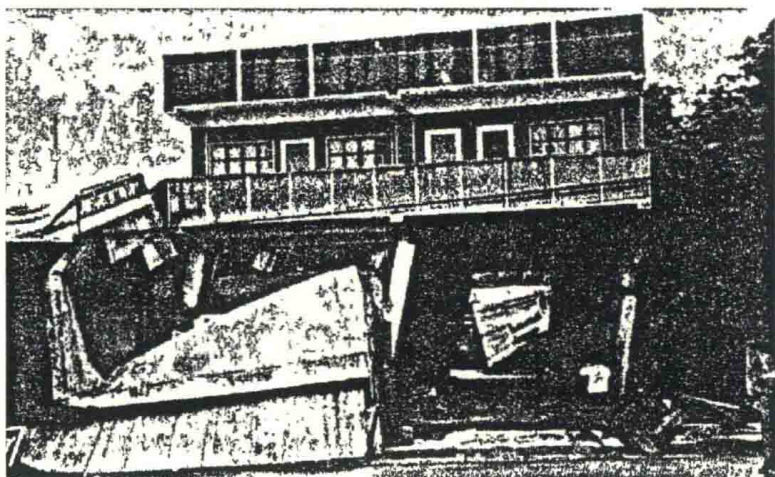
(a)



(b)

照片 1.2 橄榄景 (Olive View) 医疗中心

(a) 整体结构；(b) 局部破坏



照片 1.3 底层破坏 (1990 年菲律宾地震)

(来源: Paulay T, Priestley M J N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings [J]. 1992 (1): 3)

在实际工程中, 出现临湖别墅这样整层空旷的情形是很少的。特别值得关注的一个问题反

映在漩口中学各栋框架结构的地震破坏模式上。照片 1.4 是漩口中学 2008 年汶川地震后的面貌，各结构的平面位置示于图 1.2。图中的五栋教学楼全部倒塌，并且倒塌方向非常一致地指向操场的外侧，而紧邻教学楼 A 的办公楼 H 则没有倒塌（照片 1.5）。从结构平



照片 1.4 漩口中学震后面貌

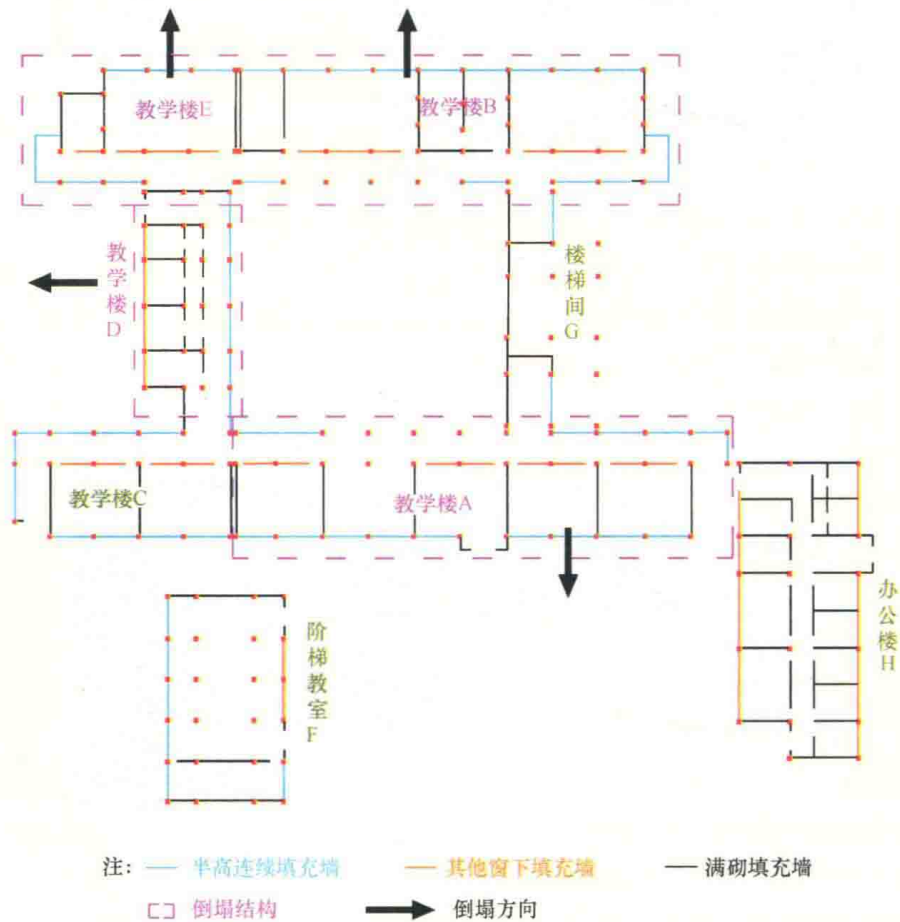


图 1.2 漩口中学各栋建筑平面位置

面图上可以看出,教学楼是外走廊式多层框架,倒塌方向均指向教室一侧,而办公楼为内走廊式多层框架,构件布置关于长轴方向对称。这一强烈对比表明教学楼的倒塌与其平面布置的不对称性可能有某种联系。

本研究从漩口中学各栋多层框架的不同地震表现入手,试图更真实地模拟实际结构的状态,通过模型试验和理论分析揭示教学楼倒塌机理。



照片 1.5 漩口中学办公楼——内走廊框架结构

第 2 章

多层RC框架结构震害特征分析

2.1 填充墙破坏

框架结构需要填充墙进行分隔和围护。在现行抗震设计规范中，填充墙的影响是这样考虑的：填充墙的质量延长了结构的自振周期；柱间填充墙增加了框架侧向刚度，又使结构自振周期折减，综合二者的影响，一般认为自振周期是减小的。这可能使原本处于反应谱第二拐点以外的框架结构第一周期减小到处于平台段，从而增加了地震荷载。

实际上填充墙都是用实心砖、空心砖、混凝土砌块或加气砌块砌筑的，不能承受剪切变形，在地震作用下表现出显著的脆性，即使结构遭遇的地震荷载不大，也能在填充墙上发现比较显著的斜裂缝。随着地震荷载的加大，框架结构出现层间变形，则填充墙裂缝继续发展，形成贯通裂缝，以致砌块被挤碎和大面积脱落。照片 2.1~2.4 显示了填充墙不同程度的破坏。



照片 2.1 芦山中学实验室多孔砖填充墙损坏



照片 2.2 芦山中学教学楼走廊填充墙破坏



照片 2.3 填充墙出平面破坏



照片 2.4 圆弧填充墙很容易出平面破坏

2.2 框架节点破坏

框架节点是梁柱交汇的区域，节点要承受拉、压、弯、剪等各种作用，受力十分复杂。处于不同拓扑位置的节点受力差异很大，破坏情况也不同。现行抗震设计规范中，通过强调“强节点、弱构件”这一设计要求来避免地震作用下结构由于局部破坏（主要指节点）而导致整体倒塌。但实际震害中，由于钢筋锚固不足、混凝土捣固不密实、箍筋设置不完全、施工缝处置不当等因素导致的节点破坏情况仍大量存在。照片 2.5~2.11 所示的就是框架结构典型的节点破坏。



照片 2.5 都江堰临湖别墅有临空面节点破坏



照片 2.6 北川禹荷花园框架节点核心剪切破坏



照片 2.7 无临空面节点一柱端出现塑性铰



照片 2.8 无临空面的节点破坏



照片 2.9 内节点破坏



照片 2.10 角柱节点破坏



照片 2.11 填充墙推挤造成的节点破坏

2.3 短柱破坏

《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010 与《建筑抗震设计规范》GB/T 50011—2010 中规定,剪跨比 $\lambda \geq 2$ 时为长柱,柱的破坏形态为压弯型,只要构造合理,一般都能满足柱的斜截面受剪承载力大于其正截面偏心受压承载力的要求,且有一定的变形能力。当 $1.5 \leq \lambda < 2$ 时为短柱,柱将产生以剪切为主的破坏。当提高混凝土强度或配有足够的箍筋时,也可能出现具有一定延性的剪压破坏。当 $\lambda < 1.5$ 时为极短柱,柱的破坏形态为脆性剪切破坏,抗震性能差,一般设计中应尽量避免,若无法避免则应采取特殊措施以保证其斜截面承载力。

照片 2.12~照片 2.15 所示为剪跨比较小时柱的破坏形态。照片 2.12、照片 2.13 是由于柱和窗间填充墙的组合形成了短柱而出现的脆性剪切破坏。照片 2.14 是由于窗下填充墙过高,对柱的约束作用很强,使柱的剪跨比显著降低而导致的脆性剪切破坏。照片 2.15 是由于在柱两侧设置了矮窗,构成了剪跨比极小的短柱而出现脆性剪切破坏。



照片 2.12 短柱—剪跨比小的窗间墙



照片 2.13 汶川县底商破坏—
开窗洞填充墙形成的短柱



照片 2.14 鲁甸中学—开窗洞填充墙形成的短柱



照片 2.15 结古镇震害—剪跨比小—短柱—剪切破坏

2.4 层倒塌

层倒塌是框架结构最常见的倒塌模式。为了克服层倒塌模式，世界各国研究人员投入了大量精力，得到的共识是“强柱弱梁”。通过提高柱的设计弯矩，使塑性铰出现在梁端，既消耗了地震能量，又保证了担负承重任务的柱的相对完整性。然而，层倒塌在多年来的历次地震中屡见不鲜，这表明目前对框架结构倒塌机理的认识以及相应的抗御措施是有问题的。照片 2.16～照片 2.19 是近年来地震中出现的结构层倒塌模式。



照片 2.16 北川大酒店第二层纵向倒塌



照片 2.17 框架底层纵向倒塌



照片 2.18 龙头山幼儿园框架底层纵向侧移



照片 2.19 玉树武警某框架底层沿纵向侧移

2.5 整体倒塌

由柱铰机制导致的层屈服破坏是结构整体失效的重要原因之一。薄弱层破坏常出现在底层，少部分结构中间层也时有出现。另外，近些年的地震中，出现大量框架结构整体倒塌的情况，照片 2.20～照片 2.22 所示为汶川地震中出现的结构整体倒塌模式。



照片 2.20 北川县政府正面



照片 2.21 北川县政府侧面



照片 2.22 北川县联社

第3章

多层RC框架模型设计与制作

3.1 模型设计

鉴于位于震中的漩口中学有外走廊的教学楼都倒了，而没有外走廊的办公楼则没倒，这里将采用地震模拟试验方法揭示这一问题的原因。试验以图 1.2 中漩口中学教学楼 A 为原型，取其中⑫~⑭轴按照 1:4 的几何比例进行设计（图 3.1）。受到振动台台面尺寸和承载能力的限制，取原型的 1~3 层进行模拟，这样做的原因主要有两点考虑，其一是原型结构的倒塌始于底层，所以底层的几何构造、边界条件和力学参数的模拟十分关键；其二是在三层的模型中增加配重总量，模拟五层原型结构对底层柱的轴压比以及倾覆力矩的影响。模型横向长 2550mm，纵向长 2250mm，模型平面图、各轴立面图及板、柱配筋图示于图 3.2~图 3.9。

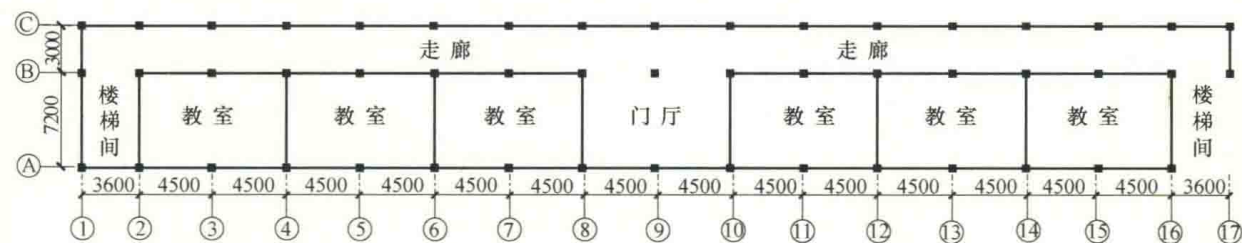


图 3.1 教学楼 A

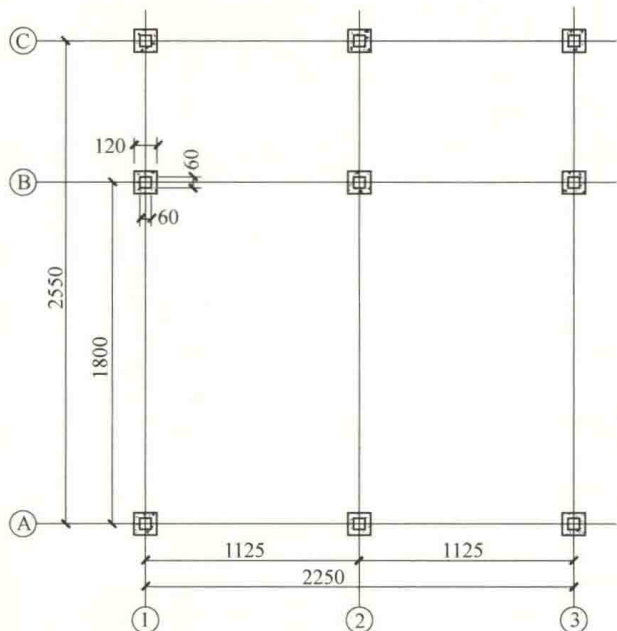


图 3.2 柱网布置图 (单位: mm)

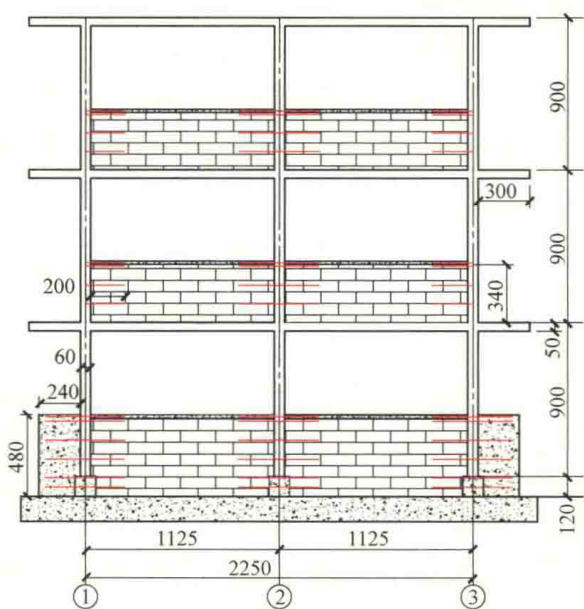


图 3.3 模型A轴立面图 (单位: mm)
(注: 红线表示拉结筋位置)