

阿拉塔,郭迅,董孝曜,等. 2024. 多层建筑结构抗震缺陷分析[J]. 地震研究, 47(4): 563–578, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0053.

A L T, Guo X, Dong X Y, et al. 2024. Analysis of the aseismic defects in multi-storey buildings[J]. Journal of Seismological Research, 47(4): 563–578, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0053.

多层建筑结构抗震缺陷分析*

阿拉塔¹, 郭迅^{2*}, 董孝曜³, 董策⁴, 罗若帆⁵, 王波²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 3. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 4. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 5. 嘉应学院 土木工程学院, 广东 梅州 514015)

摘要: 我国强震多发、震灾严重, 小震致灾、大震巨灾的状况时有发生, 而多层建筑倒塌则是造成人员伤亡的主要因素。针对这些问题, 基于2008年汶川8.0级地震以来川滇地区发生的十余次6.0级以上地震震害调查资料, 对比了“破坏”与“未破坏”建筑的结构形式、建筑平面布置、抗侧力构件分布及结构体系, 剖析了建筑结构震害特点, 总结了房屋破坏、倒塌的原因。认为在强地震中, 建筑结构发生破坏及倒塌是因为其自身存在“散”“脆”“偏”“单”等抗震缺陷, 其中“偏”的缺陷更为普遍。通过试验研究发现, 墙体的约束使结构同层各抗侧力构件的力学性能相差巨大, 即硬脆构件和弱延构件同层并存, 这有别于传统抗震设计理论将同层所有构件同等对待的情况。

关键词: 震害调查; 倒塌机理; 硬脆构件; 弱延构件; 变形饱和; 倒塌触发点

中图分类号: TU973+.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)04-0563-16

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0053

0 前言

地震灾区房屋建筑的破坏、倒塌是造成人员伤亡的最主要原因。调查建筑结构地震灾害, 总结经验教训, 对提高建筑结构抗震性能和推动地震工程学科发展具有重要意义。建筑结构地震倒塌机理一直是结构抗震研究的核心课题(顾祥林等, 2015; 郭迅, 2018)。

从2008年四川汶川8.0级地震至2022年四川泸定6.8级地震的14年间, 在我国西南地区发生了十余次强地震, 造成了大量的建筑结构破坏、倒塌, 不同结构体系的房屋在地震中呈现出的破坏模式也不尽相同。地震灾区震害调查发现, 有

大量的、经过抗震设计的建筑结构也发生了破坏甚至倒塌, 且一些震害现象也有所重复。例如, 框架结构震害显著, 且底层框架砌体混合结构倒塌比例高(公茂盛等, 2013; 杨永强等, 2014; 王多智等, 2018; 张令心等, 2019; 李昆等, 2021; 罗若帆等, 2022; 谢贤鑫, 2022; 雷雅婷等, 2022)。现场震害调查还发现, 发生破坏及倒塌的建筑结构存在“散”“脆”“偏”“单”等缺陷, 其中, “偏”的缺陷最为普遍, 但一直未引起研究人员的重视。

多层建筑结构是目前我国城乡建设中的主要建筑类型。对于高度不超过40 m, 以剪切变形为主且质量、刚度沿竖向分布较为均匀的结构, 我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)推荐

* 收稿日期: 2024-01-16.

基金项目: 云南省地震科技创新团队(CXTD202401); 国家自然科学基金面上项目(52278489); 河北省高等学校科学研究项目(BJK2022066)。

第一作者简介: 阿拉塔(1978-), 高级工程师, 博士, 主要从事建筑结构抗震研究. E-mail: alata182@126.com.

通信作者简介: 郭迅(1967-), 研究员, 博士, 主要从事结构抗震及结构损伤诊断研究.

E-mail: guoxun@cidp.edu.cn.

采用底部剪力法进行计算。另外,由于重力和地震剪力由上往下逐层累加,结构底层的地震剪力和竖向荷载最大,震害调查结果也显示底层震害最重。因此本文主要分析近 14 年来我国地震灾区建筑底层的结构平面布局、构造差异及抗侧力构件特征,对比分析“坏”与“不坏”建筑的差异,根据现场调查得到的多层建筑震害,分析震害原因,寻找建筑结构抗震缺陷,探究建筑结构地震倒塌机理。

1 建筑结构震害原因分析

自 2008 年四川汶川 8.0 级地震以来,我国地震工作者对历年发生的破坏性地震现场震害作了细致的调查,对各类建筑结构震害特点进行了深入分析,认为在破坏性地震中建筑结构发生破坏及倒塌是由于其自身存在“散”“脆”“偏”“单”等抗震缺陷所致,下面对这些缺陷引起的震害进行讨论。

1.1 由“散”引起的建筑结构破坏

房屋建筑中“散”的缺陷主要体现为结构的水

平构件与竖向构件的连接不满足要求或未进行有效连接,整体性差。我国农村地区自建的土木结构、砖木结构的震害如图 1 所示。由图 1a 可见,木构架与土墙无有效连接措施,且外围各方向墙体间连接差,墙体直接由土坯砌筑,未采取加强措施;由图 1b 可见,支撑屋面的檩条及椽子直接搭设在土墙上,在地震动的惯性作用下墙体开裂、外闪,导致墙倒屋塌。由图 1c、d 可见,砖木结构中外围纵横墙间无有效连接或连接薄弱,砖墙与木构架之间无连接措施,整体性差。一般外围砖墙无加强措施,砌筑过程中既无水平系梁也未设置构造柱,整体抗侧刚度小。另外,瓦片与屋面间无固定措施,只是将瓦片压边叠放,易发生梭瓦破坏,砌体结构中无完善的圈梁、构造柱抗震措施。纵横墙间无构造柱或连接薄弱,门窗洞口两侧无构造柱,楼板与梁连接不满足要求,如图 2a~c 所示。框架结构中女儿墙的预埋件未采取加强措施,填充墙与主体结构间拉结措施缺失或拉结筋不满足要求,导致地震作用下发生破坏,如图 2d、e 所示。另外,山墙高度和宽度超过规范限值,却未采取规定的加强措施,导致剪切破坏,如图 2f 所示。



(a) 土木结构内部构造



(b) 土木结构整体破坏



(c) 山墙与木构件连接薄弱



(d) 纵横墙连接薄弱

图 1 鲁甸 $M_s6.5$ 地震中土木结构和砖木结构震害

Fig. 1 Seismic damage of civil structures and brick wood structures in the Ludian $M_s6.5$ earthquake



(a) 鲁甸地震中砌体结构纵横墙间无构造柱



(b) 鲁甸地震中砌体结构门窗洞口两侧无构造柱



(c) 汶川地震中砖混结构楼板与梁连接薄弱



(d) 芦山地震中女儿墙加固措施不足掉落破坏



(e) 汶川地震中框架结构填充墙与结构拉结措施缺失破坏



(f) 汶川地震中山墙无加固措施破坏

图2 各类建筑结构连接薄弱破坏

Fig. 2 Some kinds of buildings damaged due to weak connections in the disastrous earthquakes

1.2 由“脆”引起的建筑结构破坏

房屋建筑因“脆”的缺陷引起的破坏甚至倒塌可以从以下两个方面分析；

首先，建筑结构材料方面，土木结构的墙体采用红泥土夯堆而起，未添加任何加筋材料；墙体下宽上窄呈梯形，无加固措施，脆性十足，如图3a所示。砖木结构中用砖砌块将木构架柱裹砌的砖柱，在横向椽子支撑点处应力集中形成贯通的竖向裂缝，如图3b所示。砌体结构中砖柱、砖墙在地震动作用下发生脆性剪切破坏，如图3c所示。

其次，房屋建筑中因洞口的设置使墙体分割成若干段墙肢。在抗震设计中，墙体按照高宽比不同计算其抗侧刚度，当高宽比小于1时只考虑剪切变形（卢存恕，1999），即地震中剪切作用为主导，形成斜裂缝或交叉裂缝，如图3d所示。框架结构中由

于墙体的布设使框架柱计算高度变小，产生短柱效应，在地震中易发生脆性剪切破坏，如图3e所示。常见的震害现象如图3f所示，由于门窗洞口的设置形成矮墙，其变形能力差，类似“短柱”效应，易发生脆性剪切破坏。

1.3 由“偏”引起的建筑结构破坏

由于墙体的布设使建筑平面内纵向各轴抗侧刚度差异巨大，地震动作用下地震剪力按照关键构件的抗侧刚度分配，地震剪力率先在刚度大、延性差的构件上集中发生破坏，而此时刚度小、延性好的构件分配的地震剪力较小，尚未发挥作用处于完好状态（郭迅，2018；王波，2020；郭富强，2023），这就是房屋建筑中“偏”的缺陷引起建筑结构的破坏。在破坏性震中由“偏”的缺陷引起结构破坏甚至倒塌的现象比比皆是，如图4

所示。我国西南乡镇地区，框架砌体混合结构大量存在，以图 4a 为例，该建筑一层平面内纵向三道轴线，临街一侧轴线因使用需求大，开门洞无墙体，进深向第二、第三轴线布设墙体，在地震

动作用下临街一侧的框架柱完好，而第二道轴线的墙体发生严重破坏。图 4b 中建筑一层纵向第一、第二轴线纵向为无墙框架柱，地震中完好，进深第三轴为带构造柱的墙体，破坏严重。



(a) 漾濞地震中土木结构夯土墙破坏



(b) 漾濞地震中砖木结构砖柱竖向裂缝



(c) 鲁甸地震中砌体结构砖柱剪切破坏



(d) 泸定地震中窗洞间墙脆性剪切破坏



(e) 汶川地震中框架结构框架柱脆性剪切破坏



(f) 长宁地震中门窗洞口间矮墙脆性破坏

图 3 各类结构在地震中发生的脆性破坏

Fig. 3 Brittle failure of various structures in the disastrous earthquakes



图 4 汶川地震 (a) 和泸定地震中 (b) 框架砌体混合结构一层震害

Fig. 4 Seismic damage to the first floor of the frame masonry mixed structure in the Wenchuan earthquake (a) and the Luding earthquake (b)

建筑抗震概念设计要求建筑结构布局均匀规整, 体形力求简单, 选择抗震有利的平立面, 抗侧力构件的刚度、强度和質量分布在空间上均衡且连续, 避免薄弱层(部位), 产生应力和变形集中。图5为汶川8.0级地震灾区建筑结构由沿高度方向存在“偏”的缺陷而发生破坏的情况。图5a



(a) 震区某建筑一层震害

为一栋钢筋混凝土框架结构, 建筑一层为空旷框架柱, 整栋建筑刚度、强度质量在竖向不连续底部产生薄弱层; 图5b所示建筑一层为框架, 二层以上为砌体结构, 竖向结构体系发生变化造成薄弱层, 二层发生垮塌破坏。建筑结构竖向不规则, 在地震中容易发生“层屈服”的破坏模式。



(b) 震区某建筑二层垮塌

图5 汶川8.0级地震灾区建筑结构层破坏

Fig. 5 The layer destruction of the buildings in the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

1.4 由“单”引起的建筑结构破坏

房屋建筑中“单”的缺陷主要由建筑抗震设防体系单一、各构件协同工作能力差、结构赘余度不足造成。地震发生时, 建筑物的某个关键构件发生破坏后承载力迅速降低, 可能形成机构失稳而连续倒塌破坏, 如图6a所示。砌体结构中缺失完善的圈梁构造柱抗震构造措施, 也是结构“单”的表现。单跨多层框架结构广泛应用于中小学教学楼、厂房; 一层只有框架柱作为抗侧力和承重的关键构件, 冗余度不足, 也是结构“单”的缺陷, 如图6b所示。

房屋建筑作为基础、墙、梁、板及柱等构件的集合体, 在地震中各构件间互相联系, 共同抵御地震作用。地震中建筑结构破坏甚至倒塌是由

个别构件或局部构件先破坏引起的, 建筑结构存在的“散”“脆”“偏”“单”等抗震缺陷, 在结构破坏中有可能是其中一个或多个缺陷导致的。例如, 土木结构、砖木结构在地震中发生破坏、倒塌就是由结构的“散”“脆”的缺陷导致的, 如图1、2f、3a所示; 砌体结构中砂浆强度不达标、圈梁构造柱不完善及砖柱未进行加强措施等造成的破坏是结构的“散”“脆”缺陷的综合体现, 如图3c、d所示; 框架结构中由填充墙的布置引起的面内刚度不均衡和框架柱的短柱效应是结构的“偏”“脆”缺陷的体现, 如图3e、f和图4所示; 另外, 砌体结构中缺失完善的圈梁构造柱抗震构造措施, 不仅是“散”的缺陷, 也是“单”的表现。



(a) 建筑一角连续倒塌破坏



(b) 单跨结构一层破坏

图6 汶川8.0级地震中建筑结构“单”的缺陷

Fig. 6 The defect of the “lack of redundancy” of buildings in the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

2 典型建筑“偏”缺陷震害分析

多层钢筋混凝土框架结构和框架砌体混合结构在历次地震中的破坏、倒塌比例较高,尤其是框架砌体混合结构。混凝土因其强度高、可塑性强、耐久性好成为建筑工程主要材料。框架结构因其空间布置灵活、自重轻、传力途径明确等特点成为公共建筑的首选结构体系。另外,城镇地区街道两侧多层建筑以一层为商用框架结构、二层次以上为民居的砌体结构为主的框架砌体混合结构居多。上节就建筑结构抗震缺陷进行了分析,但“偏”的缺陷较其他缺陷更普遍,未得到重视。

本节基于实际震害进一步对“偏”的缺陷进行分析探讨。笔者以这两种结构体系为研究对象,揭示建筑结构“偏”的缺陷,解释震害现象,探究其破坏原因。

2.1 长宁县双河中学教学楼

长宁县双河中学位于 2019 年四川长宁 6.0 级地震极震区。双河中学教学楼为四层钢筋混凝土框架结构,每层的柱网布局相同,层高均为 3.6 m,建筑总高度为 15.1 m,建筑总面积约 2 400 m²;当地抗震设防烈度为Ⅶ度,设计基本地震加速度值 0.1 g。该教学楼纵向三轴 10 跨,横向十一轴 2 跨,教学楼正面、背面及一层平面图如图 7 所示。

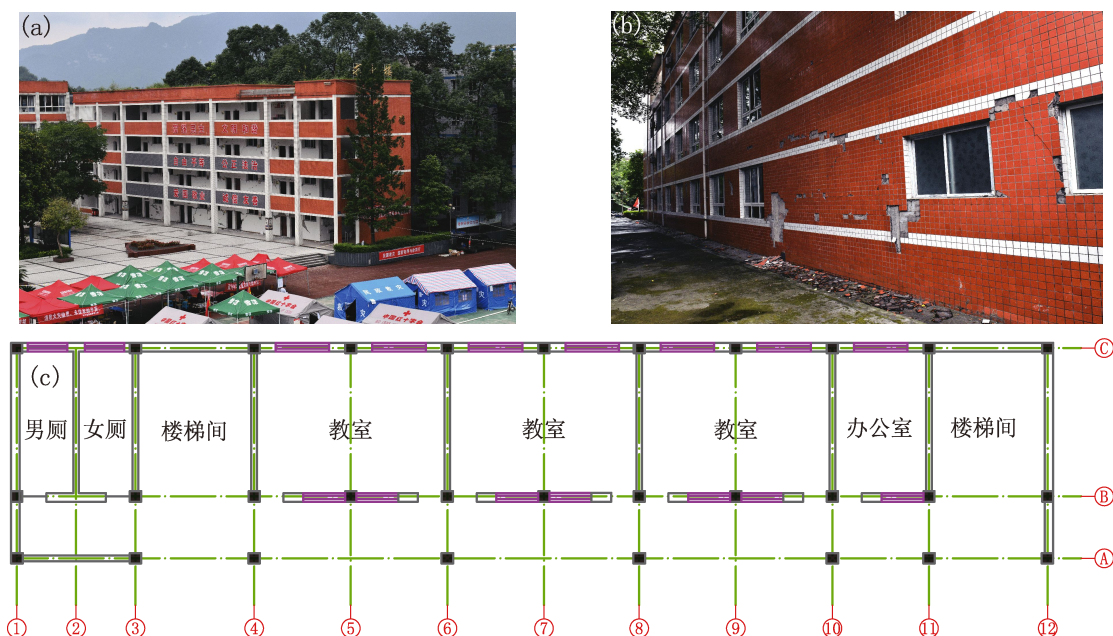


图 7 双河中学教学楼正面 (a)、背面 (b) 和一层平面图 (c)

Fig. 7 The front (a), back (b) and plan of the 1st floor (c) of a teaching building in Shuanghe middle school

由图 7c 可知,纵向仅有 3 道轴线,其主要差异在于有无填充墙、洞口大小及墙体对框架柱的约束情况;①轴线为无墙的框架柱;②轴线设有高窗和门洞,框架柱约束主要来自窗下墙(墙体较高);③轴线只有窗洞,窗下填充墙和窗间墙限制框架柱的变形。横向有 8 道满砌填充墙将一层分成若干房间。结构四层平面布局相同,以剪切变形为主,且质量、刚度沿竖向分布均匀;结构抗震计算可采用底部剪力法进行简化计算,由于结构底层所受的地震剪力最大,这里重点展示教学楼一层的震害。

正是这样的平面布局造成建筑一层纵向各轴线抗侧刚度迥然不同。由图 8a 可见,双河中学教学楼一层的①轴线为无墙的框架柱,地震作用下,框架柱全高度参与变形,抗侧刚度小,延性好,无损伤。

由图 8b、c 可见,②轴线因洞口的布设使墙体分割成若干段,采用高窗户且窗高度小,使窗下填充墙高度高,约束了框架柱变形,在地震作用下框架柱仅窗高部分参与变形,抗侧刚度大,延性差。另外,窗下墙、门头墙高宽比都较小,易发生剪切变形。



图8 双河中学教学楼一层各轴线震害

Fig. 8 Seismic damage on the axes of the first floor of the school building in Shuanghe middle school

由图8d、e可见，③轴线仅存在窗洞，且窗洞高度较高，使③轴框架柱参与变形的高度比②轴框架柱参与变形的高度还要高；③轴抗侧刚度比①轴抗侧刚度大，但比②轴抗侧刚度小；再者，框架柱窗高部分与两侧墙体共同受力、变形，延性介于①轴与②轴之间，震害主要出现在窗下墙和窗间墙，破坏程度较轻。

从以上分析可知，建筑纵向因填充墙的布设、洞口的设置造成各轴抗侧刚度、延性差异巨大，平面内刚度不均匀，导致建筑出现“偏”的缺陷。在地震作用下，地震剪力在刚度大的构件上内力集中，率先发生破坏。另外，建筑横向存在多道满砌横墙，面内刚度大，限制了建筑在地震中横

向变形，使建筑以纵向平动为主，横墙震害如图8f所示。建筑结构横向均匀布设满砌填充墙，各轴刚度相近，承载能力高，而纵向只有3道轴线，且各轴刚度差异大，承载能力弱，使得纵向成为建筑的抗震薄弱向；这种纵、横向的刚度、承载能力差异较大的情况，也是“偏”的一种体现。

2.2 磨西镇大杉树村6组56号建筑

磨西镇大杉树村6组56号建筑位于2022年四川泸定6.8级地震的极震区，其烈度为Ⅸ度。该建筑共3层，一层为框架砌体混合结构，二、三层为砌体结构。一层①轴、②轴无墙体，框架柱作为抗侧力和承重构件，③轴为带构造柱的承重墙。建筑正面、一层3D示意如图9所示。

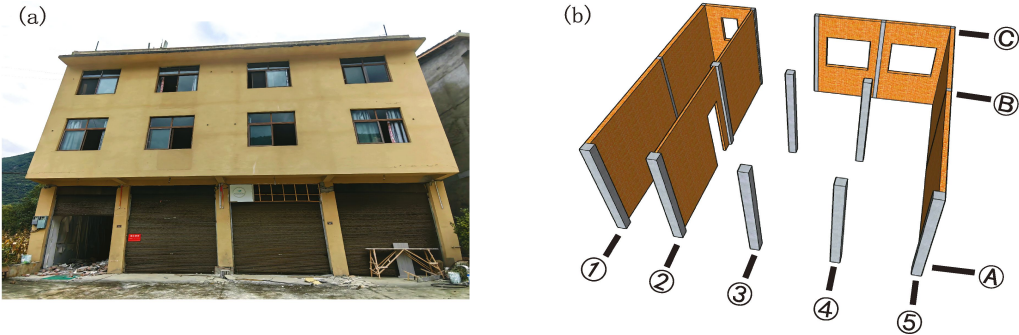


图 9 大杉树村 6 组 56 号建筑正面 (a) 和一层 3D 示意图 (b)
Fig. 9 The front view (a) of No. 56 building in Group 6 of Dashanshu Village
and 3D schematic diagram (b) of the building's first floor

现场调查发现,一层破坏严重,一层整体纵向侧移近 100 mm,二层、三层砌体结构完好,无震害。一层④轴框架柱全部震损,柱端出现塑性铰,部分柱端纵向钢筋断裂如图 10a~e 所示;一层⑥轴部分框架柱上端混凝土掉落,钢筋屈服,

出塑性铰;内横墙和山墙发生面外破坏、倒塌,如图 10f~h 所示;一层⑥轴为带构造柱的承重墙,破坏严重,墙体裂缝内外贯通,上部结构下坠,基本丧失承重能力,在地震作用下建筑一层发生扭转破坏,如图 10i~k 所示。



图 10 大杉树村 6 组 56 号建筑一层震害图
Fig. 10 Seismic damage to the first floor of No. 56 building in Group 6 of Dashanshu Village

由图 9b 可知, 建筑纵向 3 道轴线中, ①轴、②轴仅有框架柱, 无墙体; ③轴为带构造柱的砌体墙, 墙体上开设门窗洞口。首先, 这种布局使得结构一层抗侧刚度平面内不均衡; ①轴、②轴抗侧刚度远小于③轴抗侧刚度, 在地震作用下地震剪力在③轴高倍集中, 带构造柱的承重墙率先发生剪切破坏, 丧失承重能力, 上部结构下沉。其次, 一层横向墙体少, 且偏一侧布置, 伴有扭转破坏。这种由平面内刚度不均衡导致的破坏是建筑“偏”缺陷的体现。最后, 建筑一层为框架砌体混合结构, 抗侧力构件少, 二层、三层为砌体结构, 墙体布置均匀。竖向墙体不对齐、不连续, 造成竖向刚度、强度、质量差异大, 造成底层为薄弱层, 是建筑“偏”的缺陷的另一种体现。

3 “强柱弱梁”破坏模式

20 世纪 70 年代, 基于实际震害, 有学者提出钢筋混凝土框架结构在地震中发生破坏是由于框架柱端出现塑性铰, 形成层屈服的破坏机制 (Paulay, 1981; Paulay, Priestly, 1992; Park, 1999), 即“弱柱强梁”破坏模式。为防止结构出现层屈服破坏, 新西兰学者 Paulay 和 Park 提出了钢筋混凝土框架结构抗地震倒塌的“能力设计方法” (Capacity Design), 强调在地震作用下, 框架梁先于框架柱出现塑性铰, 通过梁端塑性铰使整个结构有大的内力重分布, 让尽可能多的结构构件参与到整体抗震当中, 耗散地震能量达到抗震要求。

从 2008 年汶川 8.0 级地震至 2022 年泸定 6.8 级地震的 14 年间, 多次破坏性地震造成的震害表明, 绝大部分钢筋混凝土框架结构破坏发生在柱端, 梁构件并未发生破坏, 结构工程界期望的“强柱弱梁”的整体破坏模式未出现 (清华大学土木结构组等, 2008; 叶列平等, 2008; 李碧雄等, 2009; 温增平等, 2019; 郭迅, 2019; Günay, Mosalam, 2010; 谭皓等, 2012; 岳茂光等, 2012; 闫培雷等, 2014; 李碧雄, 2015; Dizhur *et al*, 2016; Bal, Smyrou, 2016; Barbosa *et al*, 2017; Yépez *et al*, 2016; Varum *et al*, 2017; 薄景山等, 2018; Moya *et al*, 2018; 张令心等, 2019; 李昆等, 2021; 赵仕兴等, 2023)。

钢筋混凝土框架结构“强柱弱梁”的抗震设

计在地震中并未发挥作用, 实际工程中的很多因素尚未在《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 所给出的公式 6.2.2-1 中得到充分体现。叶列平 (2008) 结合震害调查资料, 从填充墙等非结构构件的影响、楼板对框架梁的影响、梁端配筋率和钢筋强度的影响、框架柱轴压比的限值及最小配筋率、配箍率影响等方面分析了“强柱弱梁”屈服机制在建筑结构的实际抗震中未能实现的原因。

汶川 8.0 级地震后, 国内外学者汲取建筑结构现场震害经验教训, 提出如下建议: 应考虑墙体不同布置方式对结构抗震性能及墙对柱约束影响 (郭子雄等, 2010; 曹家乐等, 2022); 考虑楼板对结构的影响及对框架梁的加强作用 (顾祥林, 2012); 应考虑墙框连接方式的影响 (蒋欢军等, 2014); 应减小框架柱轴压比限值 (黄思凝, 2016); 应提高框架柱端弯矩增大系数 (张浩, 2019); 应考虑填充墙对框架结构的影响 (Teguh, 2017; Baghi *et al*, 2018); 应考虑箍筋加密对承载力和变形能力的改变 (张炳辉等, 2019); 应考虑框架柱剪跨比对结构破坏模式的影响 (范晓庆等, 2019)。

通过结构抗震实践可知, 上述建议效果不理想, 且“强柱弱梁”整体屈服机制未能对建筑结构震害现象给出合理的解释。因此, “强柱弱梁”整体屈服机制有可能是存在不足, 该机制未能实现的原因有: 首先, 不能将结构同层的抗侧力和承重构件同等看待, 真实建筑结构是不同力学性能的抗侧力构件和竖向承重构件同层并存, 共同抵抗地震作用; 其次, 建筑中填充墙一般直接砌筑在框架梁上, 而梁上墙体对其的约束作用使梁端难以出现塑性变形, 出现“弱梁不弱”的情况; 最后, 目前抗震理论采用结构承载力和延性的组合抵御设定的地震作用, 在罕遇地震作用下, 通过结构的塑性变形耗能来弥补结构承载力不足, 这要求结构变形需经历弹性阶段、强化阶段、塑性变形阶段和失效阶段; 而在地震动往复作用下, 结构从开裂到临界倒塌时的变形很小, 无法经历强化阶段和塑性变形阶段就发生破坏倒塌 (郭迅, 2022)。

4 “变形饱和”倒塌机理

每次破坏性地震发生后, 都有大量的多层建

筑破坏甚至倒塌,而“强柱弱梁”理论对结构的破坏和倒塌未能给出科学的解释。针对这个问题,笔者所在的课题组对地震灾区具有代表性的房屋建筑的震害作了现场调查,经过理论分析、试验研究,提出了基于实际震害的“变形饱和”倒塌机理。

基于实际震害,以映秀镇漩口中学教学楼为原型进行了振动台倒塌试验,通过试验研究发现(王波,2020),受填充墙约束的框架柱端应变为无墙框架柱端应变的4倍左右,且率先发生破坏,即地震剪力在有填充墙框架柱上高倍集中,如图11a所示的A2柱;由于满砌横墙的刚度影响,即便结构的刚度中心与质量中心不重合,在地震作用下结构主要沿纵向发生平动,未发生扭转破坏。为了进一步探究墙体对框架柱力学性能的影响,开展了拟静力试验,研究了受墙体约束框架柱和不受墙体约束框架的本构关系,并定义了硬脆构件和弱延构件(A Lata, 2022)。

从图11b所示的各框架柱承载力-位移曲线可知,①轴框架柱的本构关系曲线呈现高、陡、窄特征,表明该构件承载力高、刚度大、延性差,称为硬脆构件;而②轴、③轴线框架柱的本构关系曲线呈现低、缓、宽特征,表明该构件承载力低、刚度小、延性好,称为弱延构件。地震剪力按照各轴抗侧刚度比例进行分配,即使侧移很小时结构内力就在①轴高倍集中,率先发生破坏并触发结构倒塌;而此时②轴、③轴线竖向构件承载力和变形能力还远未达到最大值,由①轴柱的破坏、承重失效,被连带破坏。

真实建筑结构同层是硬脆构件和弱延构件并存,在地震作用下硬脆构件上内力高倍集中,结构在较小位移下,硬脆构件率先发生脆性破坏并触发结构倒塌。其中,硬脆构件在地震作用下结构内力集中,在较小变形下其承载能力达到极限发生脆性破坏的状态称为变形饱和状态。

4.1 得妥镇南头村1组7号建筑

得妥镇南头村1组7号建筑位于2022年泸定6.8级地震的Ⅸ度区,为五层,一层破坏严重,二至四层基本完好。现场调查发现,建筑一层为框架砌体混合结构,上部各层为砌体结构。整栋建筑正立面和一层3D示意如图12a、b所示。

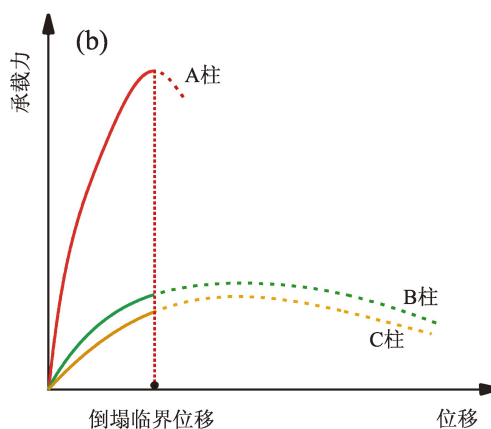


图11 各框架柱破坏状态(a)和承载力-位移曲线(b)

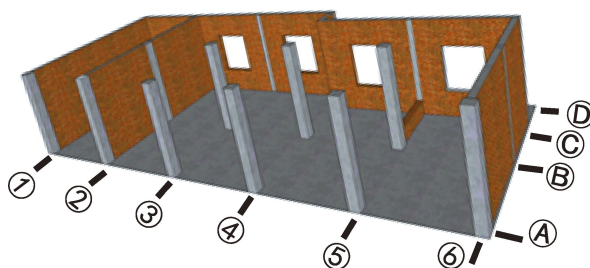
Fig. 11 The failure state of 3 frame columns (a) and the columns' force - displacement curves (b)

建筑一层为商用,临街一侧①轴和②轴无墙,只有框架柱;③轴和④轴设有窗洞带构造柱的承重墙,①轴和②轴无墙框架柱为抗侧弱延构件,③轴和④轴带构造柱的承重墙为抗侧硬脆构件。

地震作用下,建筑一层纵向①轴、②轴无墙体约束框架柱全高度参与变形;③轴、④轴带构造柱的承重墙,由于窗洞的设置,将承重墙分为若干墙段共同抵御地震作用。地震剪力在③轴、④轴墙体高倍集中,承载力达到极限值,承担的内力是其余轴线的约6倍(图12e、f),同时,变形达到饱和状态发生剪切破坏,窗间墙发生交叉斜裂缝贯通内外,如图12d所示;同层的①轴、②轴框架柱只是柱端混凝土脱落,无其他震害。从图12c可知,建筑同层由硬脆特性显著的墙体和弱延特性显著的框架柱组成,震害对比鲜明。



(a) 建筑物正面



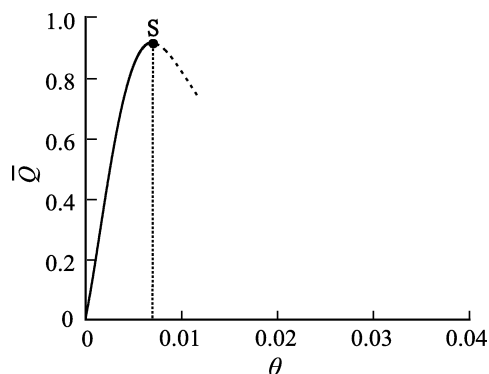
(b) 建筑物一层 3D 示意图



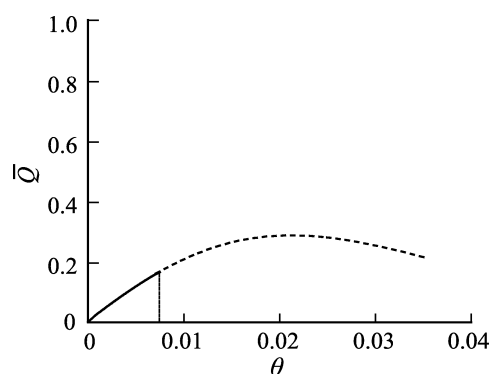
(c) 建筑物一层纵向不同构件震害对比



(d) 建筑一层C轴、D轴震害图



(e) C轴、D轴线抗侧力构件力 - 变形曲线



(f) A轴、B轴线抗侧力构件力 - 变形曲线

图 12 南头村 1 组 7 号建筑破坏

Fig. 12 Damage to No. 7 building in Group 1 of Nantou Village

在水平地震作用下，总刚度大的C轴、D轴与总刚度小的A轴、B轴力 - 变形曲线如图 12e、f 所示，其中， \bar{Q} 为各轴线上构件抗力比：

$$\bar{Q} = Q / f_v \cdot A \quad (1)$$

式中： Q 为各轴线上构件承担的水平剪力； f_v 为构件的抗剪强度； A 为构件横截面面积。

图中 θ 为层间位移角：

$$\theta = \delta / h \quad (2)$$

式中： δ 为楼板侧向位移； h 为底层净高。

由图 12e 可见，C轴、D轴的 $\bar{Q} - \theta$ 曲线又陡又高，容易快速达到饱和（图中 S 点）而丧失

承重能力，后因重力压垮导致结构倒塌。由图 12f 可见，A轴、B轴 $\bar{Q} - \theta$ 曲线又缓又低，承载力不高但延性好，不容易失效，当C轴、D轴构件被压垮时，A轴、B轴构件延性尚未发挥作用便被楼板牵连而倒塌。实际上同一层构件的刚度、延性差异过大，有些构件并未遍历（比如A轴、B轴）倒塌的 3 个过程（弹性变形、屈服、倒塌）。这就是“变形饱和”机制的倒塌模式，它区别于因“弱柱强梁”而导致的“层屈服”机制倒塌模式。Paulay 等（1992）认为，在层屈服倒塌机制中，同一层的构件共同经历了图 13 所示的弹性变形、屈服、倒塌三个过程，这与现实情况是不符的。

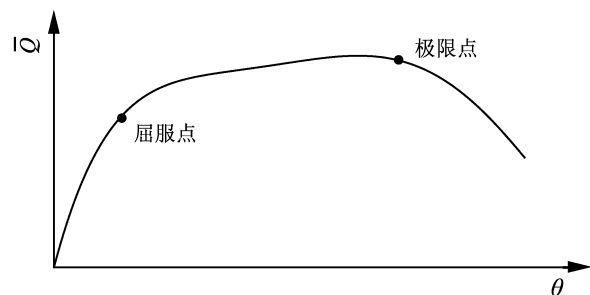


图 13 “层屈服”倒塌机制中同一楼层全部构件有相似的经历

Fig. 13 All components of the same floor having the similar experience in the “layer yielding” collapse mechanism

4.2 得妥镇中心小学宿舍楼

得妥镇中心小学宿舍楼位于 2022 年泸定 6.8 级地震的Ⅸ度区，为 4 层砌体结构，宿舍楼正面如图 14a 所示；地震后该建筑完好，如图 14c、d 所示。现场勘查发现，宿舍楼是内廊对称布局，一层、二层以上建筑平面图如图 15a、b 所示，一层 3D 示意如图 14b 所示。

宿舍楼纵向四道轴线，即便纵墙上设有门窗洞口，但开洞率相近，各轴线抗侧刚度相近；横

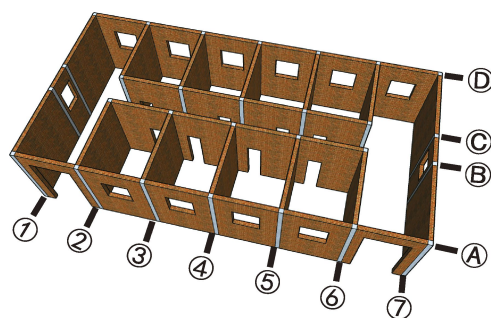
向七道轴线，布局对称，而且二至四层布置相同（图 15b），质量、刚度竖向连续。整栋建筑布置均匀规整，结构体型规则，抗侧力构件的质量、刚度、强度分布均衡对称，且具有完善的圈梁构造柱抗震措施，符合抗震概念设计原则，不存在上文指出的建筑结构抗震缺陷。

由图 15a 可知，在①轴、④轴上分配的地震剪力是在②轴、③轴上分配的地震剪力的 2 倍，各轴分配的地震剪力较均衡，在各轴抗侧刚度相差也不大；地震作用较小时，各轴剪力较小，结构的变形较小，处于弹性阶段；地震作用增大后，结构变形尚未达到结构破坏点，未发生明显的破坏，且所受地震剪力小于结构的抗力，从而使结构可以抵御地震作用，如图 15c、d 所示。

按照建筑结构变形饱和倒塌机理，该建筑的抗侧和承重构件整体约束情况相同，同层各类构件的抗震性能相近，有效避免了内力集中，没有构件率先达到变形饱和状态，因此，该建筑即使处于极震区，仍然未发生任何震损。这种建筑物抗御超设防水准地震作用，依靠的不是建筑结构关键构件的塑性变形或延性，而是构件间内力的均衡分配。



(a) 宿舍楼正面



(b) 宿舍楼一层 3D 示意图



(c) 震后宿舍楼一层通道



(d) 震后宿舍楼二层楼道

图 14 得妥镇中心小学宿舍楼

Fig. 14 The dormitory building of a primary school in Detuo Town

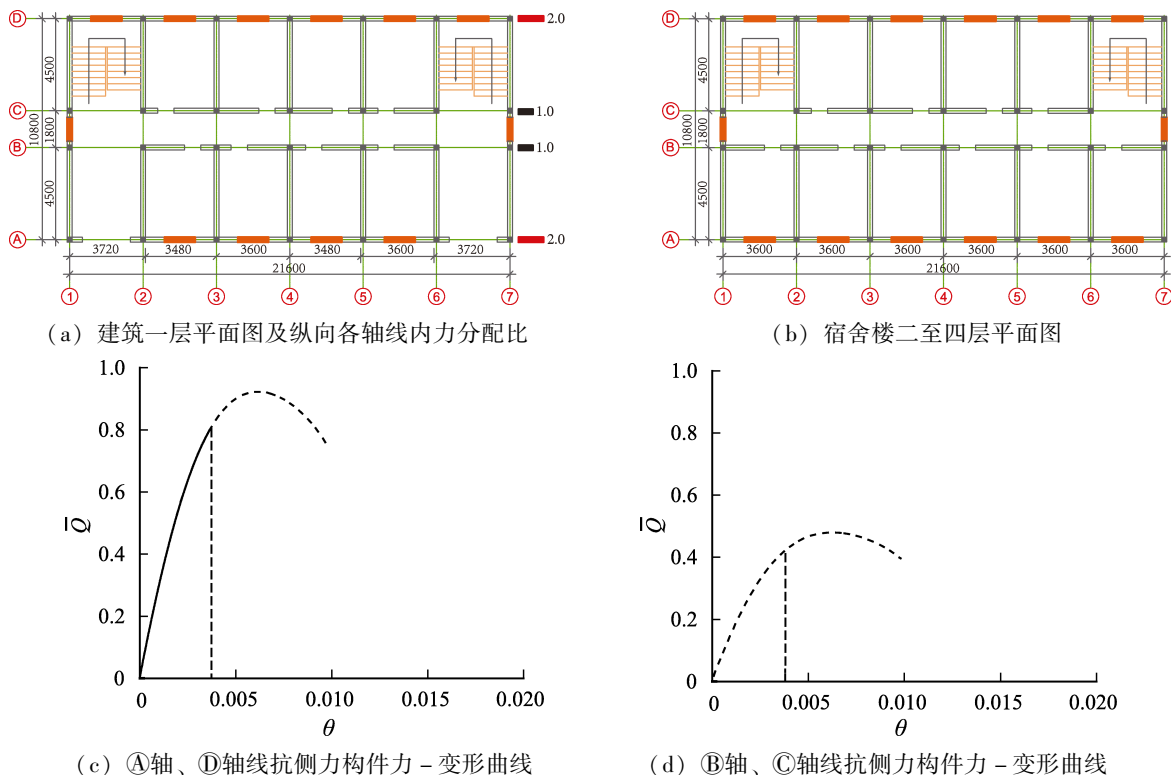


图 15 得妥镇中心小学宿舍楼一层 (a)、二层至四层 (b) 平面图及一层各纵向轴线力 - 变形曲线图 (c, d)
Fig. 15 Plans of the first (a), the second, third, and fourth floor (b), and the force - deformation curves for each longitudinal axis of the dormitory (c, d)

5 结论

本文通过总结建筑结构震害特点, 分析了地震中发生破坏和倒塌的各类房屋建筑的结构形式、建筑平立面布置、抗侧力构件分布及结构体系, 认为结构破坏、倒塌是其自身存在“散”“脆”“偏”“单”等抗震缺陷, 其中“偏”的缺陷较其他缺陷更普遍。揭示了建筑结构中“硬脆”构件和“弱延”构件同层并存是破坏和倒塌的主要原因, 得出了以下结论:

(1) 地震中建筑结构破坏甚至倒塌是由个别构件或局部构件先破坏引起的, 建筑结构存在的“散”“脆”“偏”“单”等抗震缺陷, 结构破坏倒塌过程中有可能是其中一个或多个缺陷导致的。

(2) 建筑结构中填充墙的布设使结构同层各抗侧承重构件的力学性能截然不同, 由硬脆构件和弱延构件同层并存, 其中硬脆构件通常是引起结构倒塌的触发点, 这与目前传统抗震设计理论将同一层所有构件同等看待, 且均等抵御地震作

用有着本质的不同。

(3) 传统抗震理论强调结构承载力和延性的组合抵御设定的地震作用。变形饱和倒塌机理强调构件间内力分配均衡, 只要楼层中各抗侧力构件内力均衡分配, 结构就难以破坏, 即具有合理约束, 避免“偏”的缺陷, 结构就具有很好的抗震能力。

参考文献:

- 薄景山, 李孝波, 段玉石, 等. 2018. 九寨沟 7.0 级地震学校建筑震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动, 38(5): 120 - 128.
- Bo J S, Li X B, Duan Y S, et al. 2018. Investigation and analysis of seismic damage to school buildings in $M_s 7.0$ Jiuzhaigou earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 38(5): 120 - 128. (in Chinese)
- 曹家乐, 马恺泽, 刘房添. 2022. 超高性能混凝土框架 - 核心筒抗震性能研究[J]. 华南地震, 42(1): 104 - 112.
- Cao J L, Ma K Z, Liu F T. 2022. Study on seismic behavior of ultra-high performance concrete frame - core tube [J]. South China Journal of Seismology, 42(1): 104 - 112. (in Chinese)
- 范晓庆, 郭迅, 王涛. 2019. 地震作用下钢筋混凝土柱的力学行为 [D]. 三河: 防灾科技学院.

- Fan X Q, Guo X, Wang T. 2019. Performance of reinforced concrete columns subjected to earthquake [D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention. (in Chinese)
- 公茂盛, 杨永强, 谢礼立. 2013. 芦山 7.0 级地震中钢筋混凝土框架结构震害分析 [J]. 地震工程与工程振动, 33(3): 20–26.
- Gong M S, Yang Y Q, Xie L L. 2013. Seismic damage to reinforced concrete frame buildings in Lushan $M_{7.0}$ earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 33(3): 20–26. (in Chinese)
- 顾祥林, 付武荣, 汪小林, 等. 2015. 混凝土材料与结构破坏过程模拟分析 [J]. 工程力学, 32(11): 9–17.
- Gu X L, Fu W R, Wang X L, *et al.* 2015. Numerical investigation on damage processes of concrete materials and structures [J]. Engineering Mechanics, 32(11): 9–17. (in Chinese)
- 顾祥林, 黄庆华, 汪小林, 等. 2012. 地震中钢筋混凝土框架结构倒塌反应的试验研究与数值仿真 [J]. 土木工程学报, 45(9): 36–45.
- Gu X L, Huang Q H, Wang X L, *et al.* 2012. Spatial collapse responses of reinforced concrete frame structures under earthquakes test study and numerical simulation [J]. China Civil Engineering Journal, 45(9): 36–45. (in Chinese)
- 郭富强. 2023. 基于极限承载力模型的民居建筑钢结构框架抗震性能试验分析 [J]. 华南地震, 43(2): 158–164.
- Guo F Q. 2023. Experimental analysis of seismic performance of steel frame of residential buildings based on ultimate bearing capacity model [J]. South China journal of seismology, 43(2): 158–164. (in Chinese)
- 郭迅. 2018. 钢筋混凝土框架结构地震倒塌机理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1–4.
- Guo X. 2018. Seismic collapse mechanism of reinforced concrete frame structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press; 1–4. (in Chinese)
- 郭迅. 2019. 从长宁地震反思韧性城乡建设 [J]. 防灾科技学院学报, 21(3): 1–6.
- Guo X. 2019. Profound consideration on resilient urban and rural construction from the Changning earthquake [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 21(3): 1–6. (in Chinese)
- 郭迅. 2022. 变形饱和和倒塌机理在泸定震害分析中的应用 [J]. 防灾科技学院学报, 24(4): 1–10.
- Guo X. 2022. Application of deformation saturation theory in the seismic damage analysis of Luding $M_{6.8}$ earthquake [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 24(4): 1–10. (in Chinese)
- 郭子雄, 黄群贤, 魏荣丰, 等. 2010. 填充墙不规则布置对 RC 框架抗震性能影响试验研究 [J]. 土木工程学报, 43(11): 46–54.
- Guo Z X, Huang Q X, Wei R F, *et al.* 2010. Experimental study of the seismic behavior of irregularly brick infilled RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 43(11): 46–54. (in Chinese)
- 黄思凝, 郭迅, 孙得璋, 等. 2016. 外廊式 RC 框架破坏机理的振动台试验研究 [J]. 工程力学, 33(12): 63–71.
- Huang S N, Guo X, Sun D Z, *et al.* 2016. Shaking table test on failure mechanism RC frame with exterior corridor [J]. Engineering Mechanics, 33(12): 63–71. (in Chinese)
- 蒋欢军, 毛俊杰, 刘小娟. 2014. 不同连接方式砌体填充墙钢筋混凝土框架抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 35(3): 60–67.
- Jiang H J, Mao J J, Liu X J. 2014. Experimental study on seismic performance of masonry infilled RC frame with different types of connections [J]. Journal of Building Structures, 35(3): 60–67. (in Chinese)
- 雷雅婷, 沈占锋, 许泽宇, 等. 2022. 基于 D-LinkNet 的 2014 年云南鲁甸 $M_{6.5}$ 地震建筑物损毁与重建评估 [J]. 地震研究, 45(4): 608–615.
- Lei Y T, Shen Zh F, Xu Z Y, *et al.* 2022. Evaluation of the damaged buildings in the 2014 Ludian $M_{6.5}$ Earthquake in Yunnan and their post-earthquake reconstruction based on D-LinkNet [J]. Journal of Seismological Research, 45(4): 608–615. (in Chinese)
- 李碧雄, 雷涛, 邓建辉, 等. 2009. 汶川地震中学建筑震害研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 41(3): 172–179, 215.
- Li B X, Lei T, Deng J H, *et al.* 2009. Lessons learnt from performance of school buildings in Wenchuan earthquake region [J]. Sichuan University Journal(Engineering Science Edition), 41(3): 172–179, 215. (in Chinese)
- 李碧雄. 2015. 地震中砌体填充墙和 RC 框架梁柱协同作用机理 [J]. 建筑结构, 45(4): 96–106.
- Li B X. 2015. Interaction mechanism between masonry infilled wall and bounding RC frame under earthquake [J]. Building Structure, 45(4): 96–106. (in Chinese)
- 李昆, 周煜, 陶思宇, 等. 2021. 云南漾濞 6.4 级地震公共建筑的震害特征 [J]. 世界地震工程, 37(3): 1–8.
- Li K, Zhou Y, Tao S Y, *et al.* 2021. Seismic damage to public buildings in the $M_{6.4}$ Yangbi earthquake in Yunnan [J]. World Earthquake Engineering, 37(3): 1–8. (in Chinese)
- 卢存恕, 常伏德, 吴福英, 等. 1999. 建筑抗震设计实例 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社; 13–16.
- Lu C S, Chang F D, Wu F Y, *et al.* 1999. Examples of seismic design of buildings [M]. Beijing: China Architecture & Building Press; 13–16. (in Chinese)
- 罗若帆, 金显廷, 郭迅, 等. 2022. 泸定 6.8 级地震结构震害调查与分析 [J]. 防灾科技学院学报, 24(4): 46–55.
- Luo R F, Jin X T, Guo X, *et al.* 2022. Investigation and analysis of structure damage in the Sichuan Luding $M_{6.8}$ earthquake in [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 24(4): 46–55. (in Chinese)
- 清华大学土木工程组, 西南交通大学土木工程组, 北京交通大学土木工程组. 2008. 汶川地震建筑震害分析 [J]. 建筑结构学报, 29(4): 1–9.
- Civil structure team from Tsing Hua University, Civil structure team from Southwest Jiaotong University, Civil structure team from Beijing Jiaotong University. 2008. Earthquake damage analysis of Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 29(4): 1–9. (in Chinese)
- 谭皓, 李杰, 张电吉, 等. 2011. 玉树地震框架结构建筑震害调查 [J]. 工程抗震与加固改造, 33(5): 133–139

- Tan H, Li J, Zhang D J, *et al.* 2011. An investigation on frame structure damaged in Yushu earthquake [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 33(5): 133 – 139. (in Chinese)
- 王波. 2020. 基于震害的结构倒塌机理研究 [D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Wang B. 2020. Research on collapse mechanism of structures based on earthquake damage [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 王多智, 孙柏涛, 戴君武, 等. 2018. 底部框架砖房地震倒塌调查与分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 50(2): 184 – 190.
- Wang D Z, Sun B T, Dai J W, *et al.* 2018. Collapse investigation and analysis of RC frame supported masonry structures under the earthquake [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 50(2): 184 – 190. (in Chinese)
- 温增平, 徐超, 陆鸣, 等. 2009. 汶川地震重灾区典型钢筋混凝土框架结构震害现象 [J]. *北京工业大学学报*, 35(6): 753 – 760.
- Wen Z P, Xu C, Lu M, *et al.* 2009. Damage features of RC frame structures in Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 35(6): 753 – 760. (in Chinese)
- 谢贤鑫, 潘毅, 寇创琦, 等. 2022. 泸定 6.8 级地震学校建筑典型震害调查与分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 42(6): 12 – 24.
- Xie X X, Pan Y, Kou C Q, *et al.* 2022. Typical seismic damage investigation and analysis to school buildings in the Luding M_s 6.8 earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 42(6): 12 – 24. (in Chinese)
- 闫培雷, 孙柏涛, 张昊宇. 2014. 芦山 7.0 级强烈地震钢筋混凝土框架结构教学楼震害 [J]. *土木工程学报*, 47(S1): 24 – 28.
- Yan P L, Sun B T, Zhang H Y. 2014. Seismic damage to RC frame teaching buildings in Lushan M_s 7.0 earthquake [J]. *China Civil Engineering Journal*, 47(S1): 24 – 28. (in Chinese)
- 杨永强, 公茂盛, 谢礼立, 等. 2014. 芦山 M 7.0 级地震中砖混结构民居震害特征分析 [J]. *建筑结构*, 44(18): 68 – 70.
- Yang Y Q, Gong M S, Xie L L, *et al.* 2014. Analysis on seismic damage characteristics of masonry – concrete structure dwellings in Lushan M 7.0 earthquake [J]. *Building Structure*, 44(18): 68 – 70. (in Chinese)
- 叶列平, 曲哲, 陆新征, 等. 2008. 提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法 [J]. *建筑结构学报*, 29(1): 41 – 50.
- Ye L P, Qu Z, Lu X Z, *et al.* 2008. Collapse prevention of building structures a lesson from the Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Building Structures*, 29(1): 41 – 50. (in Chinese)
- 岳茂光, 王东升, 孙志国, 等. 2012. 汶川地震下框架结构的抗倒塌能力分析 [J]. *工程力学*, 29(11): 250 – 256.
- Yue M G, Wang D S, Sun Z G, *et al.* 2012. Analysis on collapse resistant capability of reinforced concrete frame structure under Wenchuan earthquake [J]. *Engineering Mechanics*, 29(11): 250 – 256. (in Chinese)
- 张炳晖, 杨玉红, 赵亚涛, 等. 2019. 柱端箍筋不同加密的钢筋混凝土柱的抗震性能分析 [J]. *混凝土与水泥制品*, (11): 70 – 73.
- Zhang B H, Yang Y H, Zhao Y T, *et al.* 2019. Analysis of seismic performance of reinforced concrete columns with different encryption stirrups at column ends [J]. *China Concrete and Cement Products*, (11): 70 – 73. (in Chinese)
- 张浩. 2019. 柱端弯矩增大系数对 RC 框架结构抗震性能影响 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Zhang H. 2019. Effect of column end moment increase coefficient on seismic performance of RC frame structure [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 张令心, 朱柏洁, 陶正如, 等. 2019. 九寨沟 7.0 级地震房屋震害现场调查及其破坏特征 [J]. *地震工程学报*, 41(4): 1053 – 1059.
- Zhang L X, Zhu B J, Tao Z R, *et al.* 2019. Field investigation and failure characteristics of buildings damage by the 7.0 magnitude earthquake in Jiuzhaigou [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 41(4): 1053 – 1059. (in Chinese)
- 赵仕兴, 杨妹姮, 唐元旭, 等. 2023. 四川泸定 6.8 级地震震中区域建筑震害考察与思考 [J]. *建筑结构*, 53(7): 1 – 8.
- Zhao S X, Yang S H, Tang Y X, *et al.* 2023. Investigation and consideration of building damage in the epicenter of Sichuan Luding M 6.8 earthquake [J]. *Building Structure*, 53(7): 1 – 8. (in Chinese)
- GB 50011—2010. 建筑抗震设计规范 [S].
- GB 50011—2010. Code for seismic design of buildings [S]. (in Chinese)
- A L T, Guo X, Luo R F, *et al.* 2022. Experimental study on the seismic performance of RC frames considering the cast sequence of infilled walls and columns [J]. *Structures*, (44): 186 – 199.
- Baghi H, Oliveira A, Valença J, *et al.* 2018. Behavior of reinforced concrete frame with masonry infill wall subjected to vertical load [J]. *Engineering Structures*, 171: 476 – 487.
- Bal İ E, Smyrou E. 2016. Simulation of the earthquake – induced collapse of a school building in Turkey in 2011 Van Earthquake [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(12): 3509 – 3528.
- Barbosa A R, Fahnestock L A, Fick D R, *et al.* 2017. Performance of medium – to – high rise reinforced concrete frame buildings with masonry infill in the 2015 Gorkha, Nepal, Earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 33(S1): 197 – 218.
- Dizhur D, Ingham J, Griffith M, *et al.* 2016. Performance of unreinforced masonry and infilled RC buildings during the 2015 Gorkha, Nepal earthquake sequence [C]. 16th International Brick and Block Masonry Conference.
- Günay M S, Mosalam K M. 2010. Structural engineering reconnaissance of the April 6, 2009, Abruzzo, Italy, earthquake, and lessons learned, PEER Report 2010 – 105 [R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Moya L, Yamazaki F, Liu W, *et al.* 2018. Detection of collapsed buildings from lidar data due to the 2016 Kumamoto earthquake in Japan [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1): 65 – 78.
- Park R. 1999. Capacity design of ductile RC building structures for earthquake resistance [J]. *ACI Structural Engineering*, 70(16): 279 – 289.
- Paulay T, Priestley M J N. 1992. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings* [M]. New York: Wiley Interscience.
- Paulay T. 1981. *Developments in the seismic design of reinforced concrete*

- frames in New Zealand[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 8 (2): 91 – 113.
- Teguh M. 2017. Experimental evaluation of masonry infill walls of RC frame buildings subjected to cyclic loads[J]. Procedia Engineering, 171: 191 – 200.
- Varum H, Furtado A, Rodrigues H, *et al.* 2017. Seismic performance of the infill masonry walls and ambient vibration tests after the Ghorka 2015, Nepal earthquake[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 15 (3): 1185 – 1212.
- Yépez F, Yépez O. 2016. Role of construction materials in the collapse of RC buildings after M_w 7.8 Pedernales – Ecuador earthquake, April 2016[J]. Case Studies in Structural Engineering, 39(7): 24 – 31.

Analysis of the Aseismic Defects in Multi – Storey Buildings

A Lata¹, GUO Xun², DONG Xiaoyao³, DONG Ce⁴, LUO Ruofan⁵, WANG Bo²

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650024, Yunnan, China)

(2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

(3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

(4. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

(5. School of Civil Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, Guangdong, China)

Abstract

Earthquakes frequently occur in China; minor earthquakes may cause disasters and major earthquakes may cause catastrophes. And the collapse of multi – storey buildings is a major factor causing the loss of life. Aiming at these problems, and based on the earthquake damage data from the field investigation of a dozen of devastate earthquakes ($M \geq 6.0$) that have occurred in Sichuan and Yunnan since the 2008 Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake, this paper firstly compares the structural forms, plan and facade arrangement of buildings, distribution of lateral components, and structural system of the “damaged” and the “undamaged” buildings, then analyzes the seismic damage characteristics of the structures, and finally summarizes the causes of the buildings’ damage and collapse. It is believed that in the strong – earthquake event, the damage and collapse of the buildings are due to their own aseismic defects such as “dispersion”, “brittleness”, “eccentricity”, “singleness”. Among these defects, “eccentricity” in buildings is more common. Through the experimental research, it is found that the constraint of walls makes the mechanical properties of the lateral components of the same level of a building vary greatly, that is, the hard and brittle components and the weakly – extended components coexist on the same floor of a building. This is different from the traditional seismic design theory, which equally treats all components on the same floor of buildings. Finally, this paper analyzes the “eccentricity” defect of the damaged buildings in these over ten earthquake disasters, and proposes the Deformation Saturation theory that can more reasonably explain the damage and collapse of the buildings in earthquake disaster areas.

Keywords: earthquake damage investigation; collapse mechanism; hard brittle component; weakly extended component; deformation saturation; collapse trigger point