【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

底部框架-抗震墙砌体震害调研及易损性分析

李思齐¹, 张 明²

1) 东北林业大学土木工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040; 2) 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 614202

摘 要: 为了解底部框架-抗震墙房屋的震害特点及抗震性能, 利用宏观震害评定及数值分析方法, 对汶川地震后都江堰2178栋楼房的底部框架-抗震墙砌体结构进行非线性模型回归与震害特征分析. 研究结果显示, 底部框架-抗震墙砌体结构体系易于破坏的部位有底层框架与楼板、过渡层、底层节点及抗震墙. 建立了震害调查样本与结构震损等级的非线性函数及曲线模型, 可为结构抗震设计及地震烈度标准修订提供借鉴.

关键词: 地震工程; 底部框架-抗震墙砌体; 震害调查研究; 易损性分析; 易损性震害矩阵; 地震烈度; 震害指数

中图分类号: TU352

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.01091

Seismic damage investigation and vulnerability analysis of masonry with bottom frame seismic wall

LI Siqi¹ and ZHANG Ming²

1) School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang Province, P. R. China

2) School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 614202, Sichuan Province, P. R. China

Abstract: In order to understand the seismic damage characteristics and seismic performance of buildings with bottom frame seismic wall, the seismic damage characteristics analysis and nonlinear model regression are carried out for 2178 Dujiangyan buildings after the Wenchuan earthquake by using the macro seismic damage assessment and numerical analysis. The results show that the vulnerable parts of the bottom frame seismic wall buildings are the bottom frame and floor, the transition layer, the bottom node and the anti-seismic wall. The nonlinear function and curve model of this kind of structure under different intensity levels are established. The model can provide reference for seismic design of structures and revision of seismic intensity standards.

Key words: earthquake engineering; bottom frame seismic wall masonry; field observation and study; vulnerability analysis; vulnerability damage matrix; earthquake intensity; seismic damage index

汶川8.0级特大地震是一次严重的地震灾害, 破坏性强、波及范围广, 造成大量房屋及工程结构发生倒塌破坏. 贾俊峰等^[1]根据都江堰建筑震害调查结果, 研究了建筑震害空间分布与成因, 提出空

间演进是影响震害空间分布的主要因素. 李清洋等^[2]对汶川地震中底部框架-抗震墙砌体房屋进行了调研分析, 给出了不同建造年代房屋的震害特征及破坏状态. 霍林生等^[3]从地震中钢筋混凝土框架

Received: 2019-03-14; Accepted: 2019-09-11

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51608452)

Corresponding author: Associate professor ZHANG Ming. E-mail: zhangming@home.swjtu.edu.cn

Citation: LI Siqi, ZHANG Ming. Seismic damage investigation and vulnerability analysis of masonry with bottom frame seismic wall [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(1): 91-96. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

结构防震缝处的震害、竖向刚度和节点破坏等方面着手,分析了安全性措施.李碧雄等^[4]对震后多层砌体结构进行震害调查,给出了窗间墙承载力不足是破坏的主要原因,但按现行规范设计施工的则具有良好的抗震性能,建议对抗震概念设计给予足够的重视.李宏男等^[5]从工程地质震害、建筑结构震害和生命线工程震害方面着手,对汶川地震破坏情况进行了调查分析,提出在强震区应合理选取结构体系,加强桥梁结构与公路路基的抗震工作.谢启芳等^[6]对四川地震灾区古建筑的震害调查进行了分析,得到木结构在此次强震中表现出良好的抗震性能,建议推广使用木结构建筑及隔震减震技术.雷涛等^[7]对绵竹市中小学校舍震害调查,对比分析了砌体结构、木结构和框架结构的震害特征及原因.高小旺等^[8]建议底层钢筋混凝土框架-抗震墙体系应合理设置,过渡层的抗剪和抗弯能力应给予增强.侯爽等^[9]分析了汶川地震都江堰填充墙的震害情况,发现填充墙的震害明显高于主体结构.以上震害调查研究多对各类结构的个别典型破坏房屋进行调查与分析^[10-17].但是,对于某一设防烈度区域全面震害调查取样分析的研究相对较少.本研究对某区域底部框架-抗震墙砌体结构全面震害结果进行调查,运用烈度标准对实际震害情况进行震害等级评定,结合不同烈度区分析结构震害指数,以期得到某一震区底部框架-抗震墙砌体结构的实际震害情况,为该类结构的抗震设计和地震烈度标准修订提供参考.

1 房屋类型及破坏情况

为研究不同结构类型在强震中的易损性情况,对近年来实际震害调查数据进行收集,发现存在调查点过于离散的现象,故选取中国地震局组织的对汶川地震结构震害(都江堰地区)整体调查样本为基础数据.都江堰市为成都市代管的县级市,距离震中 21 km,房屋破坏严重,在整体汶川地震中属于近场强震,地跨烈度为Ⅶ、Ⅷ、Ⅸ、Ⅹ和Ⅺ区.都江堰市房屋结构大致可分为 3 类:老旧和自建房屋,均未作抗震设计;砖混砌体结构和底框结构,此类结构未考虑或未完善考虑抗震要求;经抗震设计的砌体结构、木结构、底框结构和钢筋混凝土框架结构^[11-12].

调查发现,底部框架-抗震墙砌体房屋应用非常广泛且资料丰富,底层或底部两层框架大多是人

们为了提高房屋使用功能而采用的,底部受力体系为框架结构;上部采用砌体结构作为住宅用,其受力体系为纵、横墙承重结构.对底部框架-抗震墙砌体房屋的研究大多围绕某栋典型房屋破坏展开,未能体现其破坏的一般性,因而有必要对一定区域范围内该结构类型的震害情况进行全面调查研究.都江堰市底部框架-抗震墙房屋在汶川地震中受到不同程度的震害,按照《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89)设计建设的大多数房屋并没有设置抗震墙,多数以横墙、纵墙为主,且为了满足商业的使用需求,纵墙还在临街处轴线设置少量的墙段^[2].

本研究对都江堰市 2 178 栋底部框架-抗震墙砌体结构进行了震害调查分析.调查小组按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)和《中国地震烈度表》(GB/T 17742—1999)进行细致调查,发现 20 世纪 80 年代未按照抗震规范设计、施工的底部框架-抗震墙砌体房屋遭受了不同程度的破坏.除底部框架节点、柱脚、过渡层和底层被破坏,窗间墙及窗肚墙产生交叉斜裂缝外,大量的底部框架-抗震墙砌体房屋抗震墙破坏严重.

2 砌体震害分析

2.1 部分底层框架层间位移过大,底层楼板整体坍塌

底层框架因未设置或少量设置抗震墙,导致侧向刚度要比上层砌体结构小得多,地震作用下底层的层间位移比较突出,形成底层变形集中的现象^[2].因底层框架预制楼板刚度与柱、梁刚度差异过大,且预制构件连接处锚固不足,材料强度偏低,施工质量未得到有效控制,导致底层楼板整体坍塌,如图 1.大量震害调查表明,填充墙或抗震墙失效对结构整体有一定贡献,应合理增设抗震墙,进而提高底层的侧向刚度,控制底层框架和上部砌体之间的刚度,增强主要结构构件的整体变形协调.

2.2 过渡层破坏严重

底层框架与砌体结构交界处过渡层受力、传力不协调,底层设置抗震墙一定程度增大了底层刚度.对于未在底层设置抗震墙的结构,因底层分隔和维护需要设置了部分填充墙,在抵抗地震作用中一定程度上充当了抗震墙的作用,使得结构的软弱层向上转移,过渡层的破坏程度明显比其他层严重,如图 2.甚至在平行于墙体方向的往复水平地震作用下出现过过渡层局部墙体倒塌,底层框架受损

图1 底层框架楼板严重坍塌

Fig. 1 (Color online) Serious collapse of bottom frame floor

图2 过渡层严重破坏

Fig. 2 (Color online) Serious damage of transition storey

较轻的现象. 因此, 应合理控制底层框架与过渡层的刚度比, 设置构造柱和圈梁等, 适当增强过渡层侧向刚度.

2.3 底层框架柱破坏严重

当竖向荷载过大而截面过小、混凝土强度不足时, 纵筋压屈成灯笼状, 柱内箍筋拉断或脱落, 柱子失去承载力呈压屈破坏形式^[3], 如图3. 节点柱顶受剪力和轴力复合作用, 且箍筋配置不足或锚固不好, 导致节点出现严重破坏. 调查中发现, 因底部框架-抗震墙砌体房屋具有“上刚下柔”的特点, 该类结构破坏较严重的大部分未能合理设置抗震墙, 纵横墙平面布置不协调, 且墙体砌筑质量、砂浆、砖块和箍筋设置等都未能达到设计要求, 使上部砌体结构与底层框架刚度比过大. 因此, 应严格按照抗震规范进行设计, 并保证施工质量, 从而提高结构整体性.

图3 底部框架柱严重损坏

Fig. 3 (Color online) Severe failure of bottom frame column

2.4 抗震墙破坏严重

部分底部框架和上部砌体结构基本完好, 但抗震墙破坏严重, 甚至出现整体或局部倒塌的现象. 由于钢筋混凝土梁柱组成的框架和砌体墙的力学性质不同, 在水平和竖向地震作用下, 框架梁柱、砌体墙以及楼屋盖不能很好地协同工作, 部分构件可能受力集中, 提前进入塑性状态或失效, 如图4. 但构件的倒塌在一定程度上起到了耗能减震的作用, 对底层框架起到“第一道防线”的效果. 因此, 应考虑增强抗震墙与底层受力构件的联系, 提高抗侧力能力, 进而提高抗震性能.

图4 抗震墙倒塌

Fig. 4 (Color online) Seismic wall collapsed

2.5 1999年以后经过抗震设计的底部框架-抗震墙砌体房屋基本完好

对都江堰市底部框架-抗震墙砌体房屋逐栋调查发现, 1999年以后经过抗震设计的房屋底层顶板和过渡层底板一般采用现浇或装配整体式混凝土板, 上部砌体结构采用装配式钢筋混凝土楼板的均

在该层设置了圈梁,符合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)要求,体现出良好的抗震性能,如图 5.

图 5 底框结构基本完好

Fig. 5 (Color online) Basically intact bottom frame

3 砌体房屋分析

对都江堰市 8 625 栋房屋结构进行震害调查评定,按照规范 GB/T 18208.3—2000,将房屋破坏划分为毁坏(5)、严重破坏(4)、中等破坏(3)、轻微破坏(2)和基本完好(1)等 5 个标准.根据实际震害调查现场,对震损等级分别用 51、41、42、43、31、32、33、21 和 11 来表示.为更准确描述实际震害情况,对严重破坏和中等破坏分别细分为(41, 42, 43)和(31, 32, 33).底部框架-抗震墙砌体结构有 2 178 栋,其中,倒塌 80 栋;严重破坏 396 栋(41 为 106 栋,42 为 182 栋,43 为 108 栋);中等破坏 378 栋(31 为 131 栋,32 为 154 栋,33 为 93 栋);轻微破坏 227 栋;基本完好 1 097 栋.

3.1 数据统计与数值分析

对都江堰市 2 178 栋底部框架-抗震墙砌体房屋的震害情况进行了统计与归纳.其中,50.3% 基本完好;10.4% 轻微破坏;13.1% 中等破坏;18.2% 严重破坏;8.0% 毁坏^[12-13].因数据样本离散性偏大,在选取拟合函数模型及拟合次数时存在方差过大、鲁棒性差和规律性差等现象,不能准确衡量该结构类型的震害特征.对大量数值进行 polynomial 三次拟合和 Gaussian 二次拟合^[12],所得非线性数值模型能连续逼近离散震损调查点,得到震损等级(R_D)与震害调查数量(N_D)之间的关系,如图 6.

运用 Matlab 数值分析软件分别对数据进行

图 6 震损等级与震害调查样本数量的非线性回归

Fig. 6 Nonlinear regression analysis of seismic damage grade and sample number

polynomial 三次拟合和 Gaussian 二次拟合,并按照 95% 置信区间进行数值计算,分别得到震害调查数量 N_{DP} 和 N_{DG} 为

$$N_{DP} = -0.062\ 83R_D^3 + 7.031R_D^2 - 255.5R_D + 3\ 123 \quad (1)$$

$$N_{DG} = 2.26 \times 10^{17} e^{-\left(\frac{R_D-380}{68}\right)^2} + 127 e^{-\left(\frac{R_D-40}{16}\right)^2} \quad (2)$$

3.2 底部框架-抗震墙砌体房屋地震烈度评定

根据 GB/T 17742—1999,对都江堰市 2 178 栋底部框架-抗震墙砌体房屋进行烈度评定及统计分析,表 1 为实际震害情况^[12].选取多项式四次拟合模型(IX和XI区因回归因子异常,故降低一阶回归)和 Interpolant-Shape preserving 回归模型对该区域结构损伤离散点进行非线性回归,结果请扫描文末右下角二维码查看.在低烈度区与高烈度区,该类结构的震害损伤情况比较明显,轻微破坏、中等破坏过渡性比较好和拟合度较高.

3.3 不同烈度区震害评定与平均震害指数关系分析

震害指数是指将房屋震害程度用数字来表示,通常以“1.00”表示全部倒塌,以“0”表示无损,中间需要划分若干震害等级,用 0~1.00 之间的数字来表示.平均震害指数是指在一个建筑物群或一定地区范围内所有建筑物震害指数的平均值,即受各级震害建筑物所占的比率与其相应的震害指数的乘积之和^[15].平均震害指数^[16-17]为

$$D = \sum_{i=1}^5 d_i \lambda_i \quad (3)$$

其中, d_i 为房屋破坏等级为 i 的震害指数; λ_i 为破坏等级为 i 的房屋破坏比.

表 1 实际震害情况^[12]

Table 1 Actual earthquake damage^[12] %

地震烈度	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
Ⅵ	62	30	7	1	0
Ⅶ	35	35	19	11	0
Ⅷ	22	28	28	19	3
Ⅸ	6	9	30	32	23
X	1	5	6	20	68
XI	0	2	6	14	78

表 2 为不同破坏等级与平均震害指数的上下限关系^[15]。结合都江堰各烈度区该类结构破坏数据及表 2，运用回归分析原理进行模型拟合，结果如图 7，得到了都江堰区域内该类结构的实际震害规律。拟合结果与 GB/T 17742—1999 烈度标准中所规定的震害指数基本吻合。

表 2 不同破坏等级与平均震害指数的上下限关系^[15]

Table 2 Relationship between the upper and lower limits of different seismic grades^[15] %

破坏等级	平均震害指数	平均震害指数上下限
基本完好	0	$0 \leq D < 0.10$
轻微破坏	0.20	$0.10 \leq D < 0.30$
中等破坏	0.40	$0.30 \leq D < 0.55$
严重破坏	0.70	$0.55 \leq D < 0.85$
毁坏	1.00	$0.85 \leq D \leq 1.00$

图 7 不同烈度区震害指数与烈度关系曲线

Fig. 7 (Color online) Relationship between multiple intensity zone seismic index and intensity

4 结 论

1) 调查中发现，部分 20 世纪 80 年代的底部框

架-抗震墙砌体结构因未在底层合理设置抗震墙或填充墙，导致底部位移过大，过渡层严重破坏，抗震墙或填充墙严重倒塌，但主体框架和上部砌体结构基本完好。大量 1999 年以后经过抗震设计施工的该类结构在大震中能够表现出较好的抗震性能。

2) 通过对 2 178 栋底部框架-抗震墙砌体结构震害调查数据的分析与归纳，给出了震害调查样本与结构震损等级之间的关系。并结合实际震害调查的震损情况和该区域的平均震害指数，得到地震烈度等级与平均震害指数的一般关系。由于近场地震动、场地条件和断层破裂产生的地震动对底部框架-抗震墙砌体结构作用的方向效应十分复杂，应对场地进行进一步调查，结合地震动参数和强震观测记录等资料进行更为深入的研究。

致谢：文中运用的基础数据均来自中国地震局工程力学研究所都江堰震害调查小组及中国地震烈度标准研究课题组，在此表示衷心感谢！

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51608452）
作者简介：李思齐（1983—），东北林业大学讲师、博士。研究方向：结构抗震、结构地震易损性。E-mail: 79654127@qq.com
引 文：李思齐，张 明. 底部框架-抗震墙砌体震害调研及易损性分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(1): 84-96.

参考文献 / References:

[1] 贾俊峰, 侯 爽, 欧进萍. 汶川地震都江堰市建筑震害空间分布及影响因素[J]. 大连理工大学学报自然科学版, 2009, 49(5): 764-769.
JIA Junfeng, HOU Shuang, OU Jinping. Damage spatial distribution and its influential factors in Dujiangyan City subjected to Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology Natural Science, 2009, 49(5): 764-769. (in Chinese)
[2] 李清洋, 刘 昱, 王世敏, 等. 底部框架-抗震墙砌体房屋震害调查分析[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊 1): 291-293.
LI Qingyang, LIU Yu, WANG Shimin, et al. Damage survey and analysis of masonry buildings with frame and seismic-wall in the lower stories [J]. Building Structure, 2011, 41(Suppl. 1): 291-293. (in Chinese)
[3] 霍林生, 李宏男, 肖诗云, 等. 汶川地震钢筋混凝土框架结构震害调查与启示[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 718-723.
HUO Linsheng, LI Hongnan, XIAO Shiyun, et al. Earthquake damage investigation and analysis of reinforced

- concrete frame structures in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 718-723. (in Chinese)
- [4] 李碧雄, 谢和平, 王哲, 等. 汶川地震后多层砌体结构震害调查及分析[J]. 四川大学学报工程科学版, 2009, 41(4): 19-25.
LI Bixiong, XIE Heping, WANG Zhe, et al. Wenchuan earthquake field reconnaissance and analysis on multi-story masonry structure buildings [J]. Journal of Sichuan University Engineering Science, 2009, 41(4): 19-25. (in Chinese)
- [5] 李宏男, 肖诗云, 霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 10-19.
LI Hongnan, XIAO Shiyun, HUO Linsheng. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structure, 2008, 29(4): 10-19. (in Chinese)
- [6] 谢启芳, 薛建阳, 赵鸿铁. 汶川地震中古建筑的震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2009(增刊2): 18-23.
XIE Qifang, XUE Jianyang, ZHAO Hongtie. Seismic damage investigation and analysis of ancient buildings in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2009(S2): 18-23. (in Chinese)
- [7] 雷涛, 李碧雄, 顺远坤, 等. 汶川地震中绵竹市中小学校舍震害调查分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(11): 58-62.
LEI Tao, LI Bixiong, SHUN Yuankun, et al. Damage investigation and analysis on school buildings in Mianzhu during Wenchuan Earthquake [J]. Building Structures, 2009, 39(11): 58-62. (in Chinese)
- [8] 高小旺, 李荷, 王菁, 等. 底层框架-抗震墙砖房的抗震性能[J]. 建筑结构, 1997(2): 3-8.
GAO Xiaowang, LI He, WANG Jing, et al. Seismic performance of brick buildings with frame-seismic walls on the ground floor [J]. Building Structures, 1997(2): 3-8. (in Chinese)
- [9] 侯爽, 杨伟. 汶川地震都江堰填充墙震害分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 754-757.
HOU Shuang, YANG Wei. Infill damage assessment of Dujiangyan City subjected to Wenchuan earthquake [J]. International Journal of Engineering, 2009, 49(5): 754-757. (in Chinese)
- [10] 马航, 袁磊, 李翔, 等. 基于模糊层次分析法的古城灾后建成环境评价[J]. 深圳大学学报理工版, 2019, 36(1): 101-110.
MA Hang, YUAN Lei, LI Xiang, et al. Evaluation on the environment of post-disaster reconstruction of ancient town based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2019, 36(1): 101-110. (in Chinese)
- [11] LI S Q, YU T L, JIA J F. Investigation and Analysis of empirical field seismic damage to bottom frame seismic wall masonry structure [J]. International Journal of Engineering Transactions B: Applications, 2019, 32(8): 1082-1089.
- [12] LI S Q, YU T L, JIA J F. Empirical seismic vulnerability and damage of bottom frame seismic wall masonry structure: a case study in Dujiangyan (China) region [J]. International Journal of Engineering, 2019, 32(9): 1260-1268.
- [13] ZHONG J, ZHANG J P, ZHI X D, et al. Probabilistic seismic demand and capacity models and fragility curves for reticulated structures under far-field ground motions [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 137: 436-447.
- [14] GB/T 17742—1999 中国地震烈度表[S].
GB/T 17742—1999 The China earthquake intensity scale [S]. (in Chinese)
- [15] GB/T 17742—2008 中国地震烈度表[S].
GB/T 17742—2008 The China earthquake intensity scale [S]. (in Chinese)
- [16] LI S Q, YU T L, CHEN Y S. Comparative analysis of the empirical seismic vulnerability of typical structures in multiple intensity zones [J]. Archives of Civil Engineering, 2019, 65(3): 167-183.
- [17] 管民生, 杜洪彪, 曾庆立, 等. 远场地震作用下长周期结构的基底剪重比[J]. 深圳大学学报理工版, 2017, 34(5): 488-494.
GUAN Minsheng, DU Hongbiao, ZENG Qingli, et al. Seismic base shear coefficients of long-period structures subjected to far-field ground motions [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2017, 34(5): 488-494. (in Chinese)

【中文责编: 坪梓; 英文责编: 之隼】

补充材料