

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201609004

底部框架砖房地震倒塌调查与分析

王多智^{1,2}, 孙柏涛^{1,2}, 戴君武^{1,2}, 翁旭然^{3,4}, 单若宸⁵

(1.中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2.地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局), 哈尔滨 150080;
3.福建工程学院 土木工程学院, 福州 350000; 4.地下工程福建省高等重点实验室(福建工程学院),
福州 350000; 5.山东医药工业设计院 医药化工分院, 济南 250000)

摘要: 为研究底框结构地震后的倒塌模式与废墟特征, 预测存活空间分布规律, 通过实际震害调查、数值模拟及振动台试验, 对底框结构地震倒塌后废墟特征及存活空间分布规律进行研究。首先依据目前的实际震害资料, 发现底框结构典型的三类地震倒塌模式(底框层倒塌、过渡层倒塌、整体倒塌)中底框层倒塌是相对概率较高的倒塌模式。在此基础上分析倒塌后底框结构的废墟形式, 主要为“骨断筋连型”与“松散型”两类, 并研究认为“骨断筋连型”废墟存活空间相对较大, 但是震后拆除救援困难, 而存活空间主要分布在背离倾覆一侧。同时相对于底框层, 顶层有更大的存活空间; “松散型”废墟存活空间较小, 但相对震后易于救援, 在背向倒塌方向一侧, 墙体较少的房间内靠近柱梁位置, 在梁下会有一定的存活空间。之后建立了基于有限元软件 ANSYS-LSDYNA 的底框结构废墟研究数值模型, 并阐述了模拟方法, 而底框结构震害特征、振动台试验与数值分析结果的相似证明本文废墟研究数值建模方法的正确性, 认为背向倒塌一侧且墙体较少部位人员存活空间较大。本文研究可为震后快速救援定位提供依据, 并对人员逃生提供建议。

关键词: 底框结构; 倒塌; 废墟; 存活空间; 振动台试验

中图分类号: TU392.1; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)02-0184-07

Collapse investigation and analysis of RC frame supported masonry structures under the earthquake

WANG Duozhi^{1,2}, SUN Baitao^{1,2}, DAI Junwu^{1,2}, WENG Xuran^{3,4}, SHAN Ruochen⁵

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (China Earthquake Administration), Harbin 150080, China;

3. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350000, China;

4. Key Laboratory of Underground Engineering (Fujian University of Technology), Fuzhou 350000, China;

5. Branch of Medical and Chemical, Shandong Pharmaceutical Industry Designing Institute, Jinan 250000, China)

Abstract: To investigate ruin characteristic and rules of survival space in the RC frame supported masonry structures after earthquake, seismic investigation was carried out and FEM analysis and shaking table tests were conducted. The three main collapse modes were summarized (the collapses of frame floor, transfer floor and overall structure) based on seismic investigation. The result shows that collapse of frame floor is the most common type. The connection mode and the loose mode are the two main ruin modes. The connection mode owns more survival space and is difficult for rescue, and more survival space is on the reverse direction of collapse. The top floor of frame structure has more survival spaces than the bottom floor. The loose mode owns little survival space and is easier for rescue than the connection mode. There is a certain degree of survival space on the less wall position near the beam-column, and under the beam, which lies in the reverse direction of collapse. The FEM collapse analysis of frame floor was conducted, which was based on ANSYS-LSDYNA, and the results were verified by comparing with the results of seismic investigation and shaking table tests. It shows that there is more survival space on the position of reverse direction of collapse with fewer walls. It contributes to locate the rescue position quickly after earthquake and provides important advises for evacuation.

Keywords: RC frame supported masonry structures; collapse; ruin; survival space; shaking table tests

收稿日期: 2016-09-01

基金项目: 黑龙江省博士后科学基金(LBH-Z12267); 中国地震局行业专项(201508023); 中国地震局创新团队发展计划资助

作者简介: 王多智(1982—), 女, 副研究员;

孙柏涛(1961—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 孙柏涛, sunbt@iem.cn

底框结构是指底层或底部两层为钢筋混凝土框架或钢筋混凝土框架-剪力墙, 上部为砌体结构的混合结构形式。底框结构优点很多, 比钢混框架结构造价低廉, 又能提供比砌体结构更大的底部空间; 此外底框结构施工简单、工期较短, 满足了底部开展商业活动、上部用作住宅的使用要求。因此, 底框结构

在中国中小城市十分普遍,据不完全统计,此类房屋现存约2000万栋,居住人口约1.2亿人^[1]。然而,从结构工程师的角度出发,底框结构则应该被淘汰。底框结构的底框层与砌体层相连,底部为薄弱层,结构竖向刚度突变,而且底框层抗震墙分布不对称,底部扭转作用明显,从抗震角度分析,属于不合理结构形式。历次地震震害数据显示,底框结构建筑在地震中倒塌概率极高,据统计,在汶川地震中,底框结构在北川县城内的倒塌率超过80%^[1]。但目前的社会与经济形式导致不仅暂时无法废弃这类结构形式,甚至在短期内还将继续兴建。因此,对底框结构震害特征及地震倒塌模式的研究就显得尤为重要;此外,震后人员抢救的黄金时间仅为72h,国内外应急搜救方法中均涉及建筑废墟中生存空间判定的内容^[2-6],对底框结构倒塌废墟特征与存活空间分布规律的研究则可为震后快速救援提供参考。

文献[7]进行了钢筋混凝土框架结构的振动台倒塌试验,分析倒塌特点及倒塌原因。文献[8-9]通过振动台试验总结了纯框架结构废墟的特点。文献[10-11]试验总结了砌体结构的倒塌模式、倒塌特点及其成因。文献[12]分析了局部平均刚度对底框结构抗震性能的影响。此外,底框结构形式比较特殊,属于存在底部薄弱层的混合形式,在国外较为罕见,少有相关研究。本文对汶川地震遗址中底框结构震害情况进行实地考察,并通过数值分析及振动台试验进行对比研究,明确倒塌

模式及倒塌废墟特征,在此基础上,初步估测存活空间分布规律,并对震后现场应急救援提出建议。

1 基于实际震害的底框结构倒塌模式及倒塌废墟特征

对历次地震中底框结构的震害进行搜集整理,并对汶川地震遗址中底框结构震害进行详细考察(包括地震时在建底框结构1栋,已使用底框结构8栋)。发现底框结构倒塌主要分为底框层倒塌,过渡层倒塌,整体倒塌三类,见图1^[13]。其中底框层倒塌情况居多,其震害主要表现为底部框架层完全倒塌,上部砌体基本完好;一般来讲,当底部框架层抗震墙偏少,框架层为薄弱层,“下柔上刚”现象比较明显的情况下,可能出现此种震害现象;当底部框架层抗震墙较多,“下刚上柔”现象比较明显的情况下,可能出现底部框架(含抗震墙)完好,而上部砖房(主要是过渡层)倒/坍塌的震害现象;而当底框层倒塌并发生倾斜时,上部结构与地面可能发生较剧烈碰撞,或者遭遇超过设防烈度较多的地震时,底部框架和上部砖房可能同时倒塌。当然,影响结构地震倒塌的随机因素很多,比如相邻建筑,施工质量等,上述情况只是依据地震现场倒塌调查与分析给出的初步统计规律。而依照废墟的形态,可分为“松散型”废墟与“骨断筋连型”废墟^[14-15]。以北川2栋倒塌底框结构为例,说明其倒塌及废墟特征。



图1 底框结构地震倒塌模式

Fig.1 The seismic collapse mode of RC frame supported masonry structures

1.1 北川县气象局附近底框结构

建筑位于禹龙北街,临近县气象局,破坏极为严重,建筑基本信息、震害情况见表1与图2。

1.2 北川县电信家属楼附近底框结构

建筑位于西羌上街,临近北川电信家属楼,正面临街,建筑基本信息、震害情况见表2与图3。

2 底框结构倒塌及废墟特征数值模拟与振动台试验

在实际震害分析的基础上,综合分析底框结构数值、试验模型的倒塌模式及废墟特征,有助于分析结

构抗震性能;对于震后快速搜寻、定位被压埋人员,评估救援现场安全性具有十分重要的作用^[14-15]。

2.1 底框结构振动台倒塌试验

在PKPM中按照现行规范设计4层底框结构,地震设防烈度为7度(0.1g),场地类别为II类,模型设计所取地震分组第一组。X向4跨,Y向2跨,跨度均为4.2m;底部框架柱截面400mm×400mm,梁截面300mm×600mm,构造柱边长为240mm,圈梁厚240mm,高300mm,砌体部分砖墙厚240mm,一层层高4.5m,二~四层层高3.0m。砌体部分采用MU10烧结砖及M10水泥混合砂浆。混凝土构件为C30混凝土。

表 1 建筑基本信息及震害描述 1

Tab.1 The building information and seismic damage-1

项目	描述
建筑名称	底框建筑 1(北川县气象局附近)
废墟类型	“松散型”
结构形式简述	五层底框结构,底部一层为框架,上部为空心预制楼板砌体结构;底框层层高 3 m,其余各层层高 2.8 m.
震害情况	由于原结构上部采用预制楼板,连接强度较弱,且圈梁、构造柱等构造措施不足,造成上部整体性差,在地震中表现出部分垮塌的“松散型”废墟特点.底框层基本完全倒塌,几乎所有框架柱的柱头、柱脚节点均出现失效,仅留有少量存活空间;正面三层以上③~⑥轴所围空间结构构件大面积散落,其他位置基本保持正常存活空间.
原结构平面简图	

表 2 建筑基本信息及震害描述 2

Tab.2 The building information and seismic damage-2

项目	描述
建筑名称	底框建筑 2(北川县电信家属楼附近)
废墟类型	“骨断筋连型”
结构形式简述	五层底框结构,底部一层为框架结构,上部四层为砌体结构,层高 3.3 m.
震害情况	底框柱柱顶节点均出现失效,柱子发生较大平面位移并出现扭转,部分柱子插入相邻山墙或二层楼板中;底框层几乎完全倒塌,留有少量存活空间;上部四层基本保持正常使用空间.底框层向①轴方向倒塌,一层除 A6 柱向⑥轴方向倾斜外,其余柱均向①轴方向倾斜.
原结构平面简图	

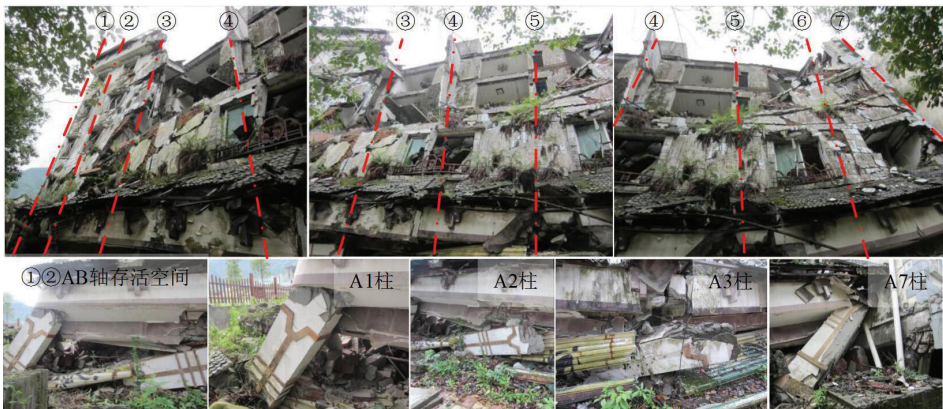


图 2 底框结构 1 废墟图

Fig.2 The ruin of RC frame supported masonry structures-1



图 3 底框结构 2 废墟图

Fig.3 The ruin of RC frame supported masonry structures-2

梁柱与剪力墙钢筋采用 HRB335,梁柱箍筋、墙内拉结筋采用 HPB300.两模型的上部砌体结构与下部底框的刚度比不同,其中无翼墙模型为 2.23,有翼墙模型为 1.11.试验模型缩尺比为 1 : 6,材料采用细石混凝土,钢筋皆为镀锌铁丝,强度 Q235;填充墙为 MU10 粘土砖,M10 砂浆.设计信息见表 3 与图 4.

表 3 材料信息

Tab.3 The material

属性	原型			模型	
	C30	HRB335	HPB300	C10	HPB235
弹性模量/GPa	30	200	210	17.5	210
抗压强度/MPa	30	335	300	10.3	235

试验选用 3 条地震动,分别为 1940 年 Imperial 山谷地震的 El Centro 地震动(美国,1940)、集集地

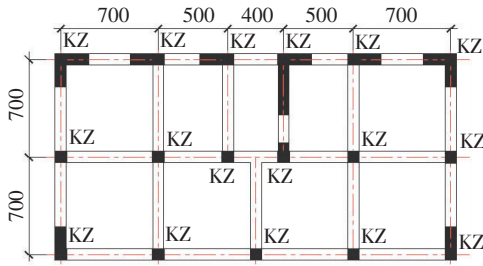
震 TCU084 地震动(中国台湾,1999)与卧龙地震动(中国,2008).采用三向加载,无翼墙模型与有翼墙模型分两次单独进行试验,具体试验工况见表 4.

作用下边缘与地面发生猛烈撞击,二、三层撞击侧墙体粉碎,另一侧墙体全部拉裂;四层墙体破损严重.

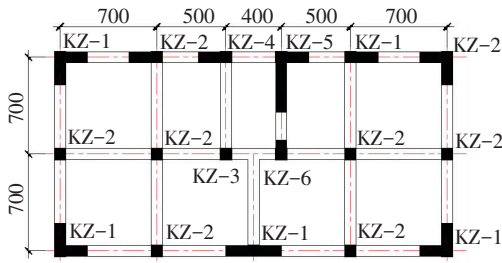
表 4 试验工况

Tab.4 The test conditions

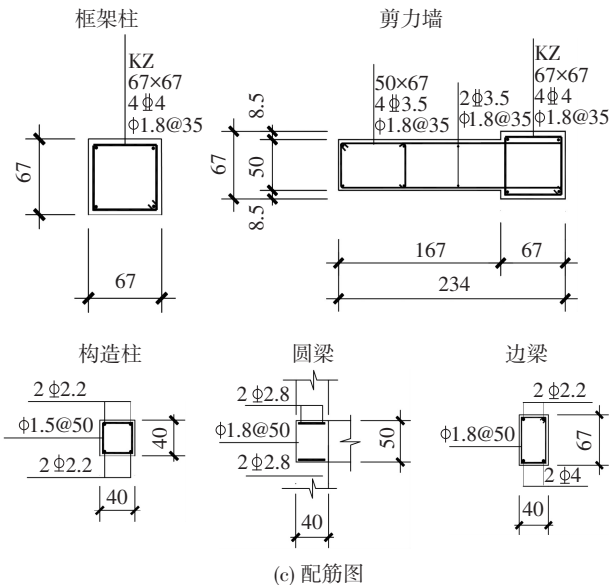
无翼墙模型			有翼墙模型		
工况	地震记录	输入 PGA	工况	地震记录	输入 PGA
T1	白噪声	0.020g	T1	白噪声	0.020g
T2	El Centro		T2	El Centro	
T3	卧龙	0.035g	T3	卧龙	0.035g
T4	TCU084		T4	TCU084	
T5	白噪声		T5	白噪声	0.020g
T6	El Centro		T6	El Centro	
T7	卧龙	0.100g	T7	卧龙	0.100g
T8	TCU084		T8	TCU084	
T9	白噪声	0.020g	T9	白噪声	0.020g
T10	El Centro	0.200g	T10	El Centro	0.200g
T11	卧龙	0.220g	T11	卧龙	0.220g
T12	TCU084	0.200g	T12	TCU084	0.200g
T13	白噪声	0.020g	T13	白噪声	0.020g
T14	El Centro	0.350g	T14	El Centro	0.350g
T15	卧龙	0.300g	T15	卧龙	0.330g
T16	TCU084	0.300g	T16	TCU084	0.310g
T17	白噪声	0.020g	T17	白噪声	0.020g
T18	El Centro	0.400g	T18	El Centro	0.410g
T19	卧龙	0.400g	T19	卧龙	0.400g
T20	TCU084	0.400g	T20	TCU084	0.500g
T21	TCU084	0.400g	T21	白噪声	0.020g
T22	TCU084	0.400g	T22	El Centro	0.610g
T23	白噪声	0.020g			
T24	卧龙	0.650g			
T25	白噪声	0.020g			
T26	TCU084	0.550g			
T27	白噪声	0.020g			
T28	TCU084	0.800g			
T29	白噪声	0.020g			
T30	卧龙	0.800g			
T31	白噪声	0.020g			
T32	卧龙	0.900g			
T33	白噪声	0.020g			
T34	TCU084	0.900g			



(a) 无翼墙模型底层平面图



(b) 有翼墙模型底层平面图



(c) 配筋图

图 4 试验模型

Fig.4 The plan for tested model

无翼墙模型在 PGA0.400g 时就已濒临倒塌.倒塌前,底层框架柱尤其是无翼墙一侧柱端破坏严重,已经出现明显倾斜,横向混凝土抗震墙扭转裂缝十分明显,破坏主要集中在底框层.而有翼墙模型抗震性能远好于无翼墙模型,在PGA0.900g的地震动后结构才濒临倒塌,倒塌前,有翼墙模型二层砌体窗肚墙处砌块出现破坏并掉落,增加的抗震墙受剪破坏十分明显,但其整体倾斜变形仍小于倒塌前的无翼墙模型,倒塌前底框层与转换层均出现破坏.两模型的倒塌过程见图 5,均是结构一层框架朝向某一角柱方向变形,同时伴随扭转,底层变形过大引起失稳倒塌,二层以上结构随之倾覆,二层楼板在惯性力

2.2 数值与试验模型倒塌模式分析

有限元分析软件选用 ANSYS-LSDYNA,单元类型选择 SOLID164.底框结构所含材料中混凝土、砌体材料模型均比较复杂,其对倒塌模式与抗震性能影响较大,所以混凝土与砌体材料模型的选择极为重要.针对可选择的 4 种混凝土材料 MAT_072、MAT_072R3、MAT_084、MAT_111 进行了对比分析,考察以上各种混凝土材料的拉压及滞回性能,包括单轴拉、单轴压、单轴拉压反复荷载下的性能,最终选择了一种相对适合倒塌模拟的材料 MAT_072R3,其特点是受压下降段塑性略强,但材料强度最为接近理论值.与混凝土相比,框架柱地震破坏的钢筋模型则相对比较简单,选择 MAT_PLASTIC_

KINEMATIC,其效果已被多项研究验证^[16].砌体材料模型则选择 Winfrith 材料模型,可以较好模拟砌体的开裂,并可依据需要,通过定义最大拉应变设定失效裂缝宽度,通过最小主应变失效准则判别砌体的受压失效.数值与试验模型见图 6.

塌模式类似,但倒塌过程是不同的,见表 5.



(a) 无翼墙模型

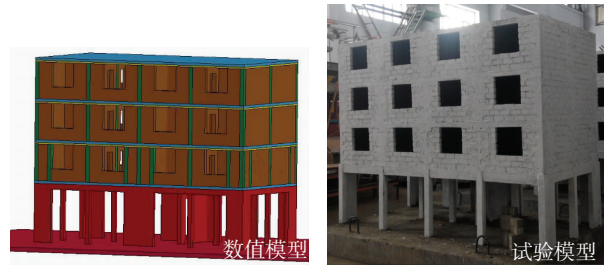


(b) 有翼墙模型

图 5 模型倒塌过程

Fig.5 The collapse process of model

试验中两模型的最终倒塌模式基本相同,都是由于框架层的破坏造成整体结构的倒塌.由于两模型的底部框架层的平面布置不均匀,造成两模型均向平面刚度较小的一侧倾斜倒塌.虽然两模型的倒



(a) 无翼墙结构模型



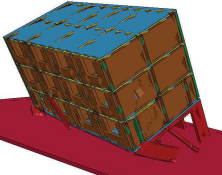
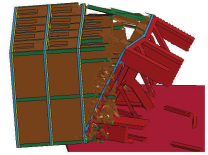


(b) 有翼墙结构模型

图 6 结构数值与试验模型

Fig.6 The numeral and test model

表 5 有无翼墙模型震害区别

Tab.5 The difference of seismic damage for RC frame supported masonry structures with &without the wing wall

项目	无翼墙模型	有翼墙模型
废墟数值模型		
废墟试验模型		
倒塌 PGA	0.400g	0.900g
破坏部位	倒塌前主要集中在框架层,砌体部分倒塌接触地面前没有发生明显破坏,倒塌后破坏明显.	转换层破坏—底框层破坏—发生倒塌;倒塌前底框层与砌体层均明显破坏.
废墟类型	“骨断筋连型”	
开始倒塌方向	平面刚度较小一侧	

2.3 数值与试验模型废墟特征分析

本试验的两个结构模型为“骨断筋连型”,但是由于结构整体倒塌下落过程中的冲量作用,两模型的转换层出现砌块大量散落,使得局部废墟呈现为“松散型”状态,见图 7.其废墟特征及存活空间分布规律见表 6.



(a) 无翼墙模型



(b) 有翼墙模型废墟

图 7 废墟模型

Fig.7 The ruin model

表 6 模型废墟特征及存活空间

Tab.6 The ruin characteristic and survival space for model

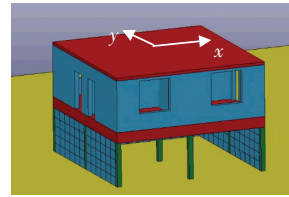
层数	废墟特征与存活空间
一层 (底层)	在翼墙较多或背离倒塌方向一侧存活空间较大;在倒塌方向一侧,一层基本被完全压埋,属于密实型废墟,不存在存活空间.
二层与三层 (中间层)	在结构倾斜倒塌的过程中二、三层破坏严重,基本被拉断,成为“松散型”废墟,在背离倒塌方向一侧其内部完全暴露出来,存在一定的存活空间;而倒塌方向一侧的空间基本被失效的构件填满,不存在存活空间.
四层 (顶层)	虽然顶层位移最大,伴随结构倾斜倒塌落地,且与地面发生冲击作用;但从外观判断,第四层基本没有太大破损,内部空间并没有受到严重的危险物威胁,整层都存在存活空间.

3 底框结构废墟模型存活空间分布

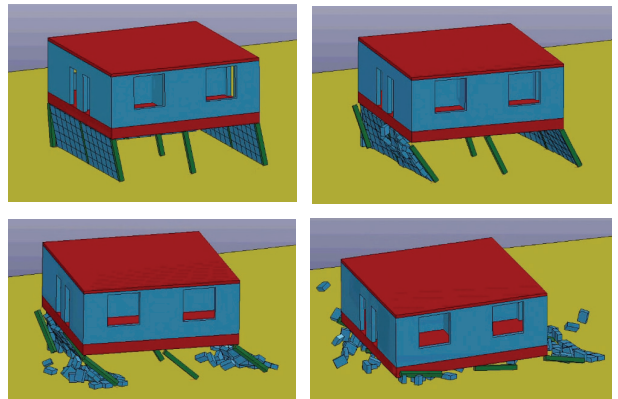
数值与试验分析中发现,底框层的墙体首先破坏并退出工作,随后底框层框架柱的柱头柱脚破坏.通过对实际底框倒塌震害的总结,发现底框结构底框层倒塌概率偏大,而柱头柱脚破坏时,部分钢筋并没有拉断,即为“骨断筋连型”的废墟模式,此类废

墟形式在实际震害中数量也较大.

假设建筑结构底部框架层倒塌,上部砌体部分较为完好,破坏为柱头柱脚破坏,但是还会存在钢筋连接,即“骨断筋连型”破坏.在建模的时候将结构可能发生破坏的部分分别建模,建立框架柱、上部砌体和底板的模型,并且设置单面摩擦接触,按照震害特征,假设倒塌后柱头柱脚的钢筋并未折断,因此用弹簧单元将柱头柱脚节点与上部砌体和下部底板连接;此外,假设填充墙即将发生破坏,将填充墙分块建模,每块之间设置摩擦接触,模型见图 8(a).在进行建模的过程中,参考前文试验模型的方法进行实体建模,加载地震动后观察模型的倒塌模式.模型受到地震作用后的倒塌过程见图 8(b),发现模型是先向垂直于横墙方向倾斜,符合实际震害的破坏规律,随着破坏进一步发展,模型出现扭转,继而倒向没有填充墙的一侧,最终底层坍塌.在“骨断筋连”的框架柱作用下,填充墙并没有发生大面积散落,柱子也未完全与上部结构和下部基础分离,这类倒塌模式及废墟特征符合多数实际震害情况.



(a) 数值模型



(b) 模型倒塌过程

图 8 废墟模拟数值模型及其倒塌过程

Fig.8 The model and collapse process for FEM model

为易于观察震后模型废墟情况及存活空间分布,在后处理中将楼板与屋面板设置为透明,因此,可以无障碍查看填充墙散落方式并确定存活空间的位置.由图 9 可以看出对于“骨断筋连型”底框结构的废墟,在背向倒塌方向一侧,横纵墙较少的房间内靠近梁柱的位置中没有填充墙的压埋,在梁下会有一定的存活空间.这对于震后快速进行救援定位有着重要意义.



图9 模型透视图

Fig.9 The perspective of model

4 结 语

由实际震害调查总结出底框结构三类典型地震倒塌模式,认为底框层倒塌情况居多.通过对震后废墟实地考察明确了底框结构震后倒塌典型废墟类型(“骨断筋连型”与“松散型”)及其特征.结合倒塌模式及废墟特征的数值模拟与振动台试验研究认为:“骨断筋连型”废墟整体性较好,倒塌后可能存在足够的存活空间,但拆除救援相对困难.“松散型”废墟倒塌部分较难形成足够的存活空间,但相对容易挖掘救援.此外,废墟倾覆一侧承重构件破坏明显严重于背离倾覆一侧,而存活空间主要分布在背离倾覆一侧.同时相对于底框层,顶层有更大的存活空间.对于“骨断筋连型”底框结构的废墟,在背向倒塌方向一侧,墙体较少的房间内靠近柱梁位置,在梁下会有一定的存活空间.而对于底框结构中的逃生人员,在地震中底框层上部存在更多的存活空间.

参考文献

[1] 单若宸. 典型底框砌体结构地震倒塌模式及其废墟结构特征研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2015:7-11.
SHAN Ruochen. A research on the typical bottom frame masonry structure's mode of collapse and structural characteristic of ruins in earthquakes [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015:7-11.

[2] Insarag guidelines for international search and rescue [M]. Washington: International Search and Rescue Advisory Group, Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, 2009:25-36.

[3] New Zealand Civil Defence Emergency Management. General rescue manual [M]. Washington: Ministry of Civil Defense & Emergency

Management (MCDEM), 2001: 21-33.

[4] Miami Fire Rescue Department. Collapsed structure search and rescue course [M]. Washington: Office of US Foreign Disaster Assistance (OFDA), 2002:17-29.

[5] LIU X L, LI C S. HIPRED: An expert system for structural preliminary design of high-rise buildings [J]. Advances in Steel Structures, 1996, II: 899-994.

[6] TZAFESTAS S. Expert systems in engineering applications [J]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993:367-378

[7] 黄思凝. 外廊式 RC 框架地震破坏及倒塌机理研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012:36-41.
HUANG Sining. A research on gallery-type RC frame structure's mechanism of destruction and collapse [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2012: 36-41.

[8] 许卫晓, 孙景江, 杜轲, 等. 框架结构底层薄弱震害分析和改进措施研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 138-144.
XU Weixiao, SUN Jingjiang, DU Ke, et al. A research on earthquake's harm and improvement measures at the bottom weak story of frame structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 138-144.

[9] 许卫晓. 阶梯墙框架结构抗震性能及设计方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014:11-27.
XU Weixiao. A research about the anti-seismic ability and design approach of stepped wall frame structure [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014: 11-27.

[10] 崔崧. 典型砌体结构地震倒塌模式及其废墟结构特征研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015:36-47.
CUI Song. A research on the typical masonry structure's mode of collapse and structural characteristic of ruins in earthquakes [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2015:36-47.

[11] 胡杨. 砌体结构地震破坏模式及倒塌试验研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014:25-33.
HU Yang. Study on failure mode and collapse mechanism of masonry structures under earthquakes [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014:25-33.

[12] 邓宏宇, 孙柏涛. 局部平均刚度比对底框结构抗震性能的影响 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(12): 1-8.
DENG Hongyu, SUN Baitao. Local mean stiffness ratio's influence on anti-seismic ability of bottom frame masonry structure [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(12): 1-8.

[13] 王多智, 戴君武, 单若宸. 底框结构地震倒塌模式及其抗倒塌方法研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34:317-322.
WANG Duoqi, DAI Junwu, SHAN Ruochen. A research on the bottom frame masonry structure's mode of collapse in earthquakes and anti-seismic methods [J]. Earthquake Engineering And Engineering Dynamics 2014, 34:317-322.

[14] 王东明. 地震灾场模拟及救援虚拟仿真训练系统研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008:11-15.
WANG Dongming. A research on earthquake disaster's simulation and virtual emulational train system of rescue [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2008: 11-15.

[15] 王东明, 刘欢, 李永佳. 砖混结构废墟救援安全评估 BP 模型研究 [J]. 灾害学, 2016, 31(2): 10-15.
WANG Dongming, LIU Huan, LI Yongjia. Research on security evaluation BP model of brick-concrete structure ruins [J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(2): 10-14.

[16] ANSYS/LS-DYNA 使用指南 [M]. 北京: 安世亚太, 1999:57-58.
ANSYS/LS-DYNA user's guide [M]. Beijing: Pera Global (Beijing) Limited Company, 1999:57-58.

(编辑 赵丽莹)