

文章编号: 1000-4750(2016)09-0059-10

尼泊尔 8.1 级地震钢筋混凝土框架典型震害及讨论

张昊宇, 王 涛, 林旭川, 曲 哲, 毛晨曦

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江, 哈尔滨 150080)

摘 要: 尼泊尔 8.1 级地震发生 2 个月后, 该文作者随队开展了为期半个月的尼泊尔地震震害调查。该文报道了尼泊尔 8.1 级地震中 3 个调查点的钢筋混凝土(RC)框架结构震害特点。调查表明, 除少数医院、政府办公楼、学校建筑为正规抗震设计建造外, 大部分 RC 框架结构为自建民居、商铺。被调查 RC 框架结构的梁、板、柱均采用现浇混凝土, 填充墙均采用粘土砖砌筑。震害主要表现为底层或临街楼层(街道高于底层时)框架柱压弯破坏, 填充墙倒塌, 柱顶水平施工缝处破坏, 部分紧邻填充墙的柱顶部剪切破坏, 屋顶女儿墙震损掉落, 少数结构发生整体垮塌。该文作者对某一典型区域的框架结构进行了详查, 得到 6 个震损结构的尺寸、材料强度和破坏模式, 分析表明, 具有较小柱轴压比, 较大刚重比的结构具有较好的抗倒塌能力。最后, 针对尼泊尔 RC 框架的震害特点, 对比我国相关规范规程和以往震害经验, 探讨了防止填充墙相邻柱端剪切破坏的措施、防止施工缝对柱的削弱、非结构构件抗震构造措施的必要性, 以及震后建筑安全性鉴定的注意事项。

关键词: 尼泊尔地震; 震害调查; 钢筋混凝土框架; 倒塌; 抗震措施

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.07.0622

SEISMIC DAMAGES OF RC FRAMES IN NEPAL MS 8.1 EARTHQUAKE

ZHANG Hao-yu, WANG Tao, LIN Xu-chuan, QU Zhe, MAO Chen-xi

(Institute of Engineering Mechanics, CEA, Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,

Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: A half-month seismic reconnaissance survey has been conducted two months after Nepal Ms. 8.1 earthquake. This paper reports the seismic hazards observed in reinforcement concrete (RC) frame structures at three sites. Only a few important RC frame buildings are anti-earthquake designed, such as hospitals, government buildings and schools, while the rest are non-engineered residential buildings and commercial buildings. All these RC frames were casted in-site, and the infilled walls are clay brick masonries. Typical damages include compression-flexure combined failure in the first storey or in the storey parallel with the street, cracking and collapse of infilled masonry walls, damages close to construction joint in columns and beam-to-column joints, shear failure of the columns due to adjacent infilled walls, falling of the parapet, and total collapse of several RC frames. Detailed survey was given to six damaged RC frames in Charikot, with dimensions, material strength, and failure modes being physically measured and acquired. It is shown that a good seismic performance is always associated with frames having smaller axial force ratios and larger stiffness-to-weight ratios. Finally, considering the measures stipulated in Chinese seismic design codes and seismic hazards in recent strong earthquakes, it is

收稿日期: 2015-07-29; 修改日期: 2015-12-29

基金项目: 地震行业科研专项经费项目(201308003); 国家科技支撑计划课题项目(2015BAK17B06); 国家自然科学基金青年基金项目(51108433); 黑龙江省科学基金面上项目(E2015067)

通讯作者: 王 涛(1977—), 男, 山东邹城人, 研究员, 博士, 主要从事结构抗震研究(E-mail: wangtao@iem.ac.cn).

作者简介: 张昊宇(1978—), 男, 吉林人, 副研究员, 博士, 主要从事混凝土结构震害鉴定研究(E-mail: concretez@163.com);

林旭川(1984—), 男, 浙江温州人, 副研究员, 博士, 主要从事结构工程抗震、数值仿真研究(E-mail: linxc03@gmail.com);

曲 哲(1983—), 男, 陕西西安人, 副研究员, 博士, 主要从事建筑结构减隔震研究(E-mail: quz@iem.ac.cn);

毛晨曦(1974—), 女, 辽宁辽阳人, 研究员, 博士, 主要从事结构震害评估及震后可自恢复结构研究(E-mail: maochenxi2006@163.com).

necessary to prevent RC frames from shear failures, nonstructural damages and collapses, while safety assessment after earthquake are also discussed.

Key words: Nepal earthquake; seismic reconnaissance; RC frame; collapse; anti-seismic measures

2015年4月25日,尼泊尔境内发生了里氏8.1级强震,之后多个强余震相继发生^[1](图1),建筑破坏,人员伤亡严重,尼泊尔遭受了重大的人员、经济损失。应中国商务部要求,中国地震局组织了赴尼泊尔的地震现场工作队,于6月5日~6月19日开展了为期15天的震害评估工作。工作队调查了Sindhupalchok、Dolakha、Kavrepalanchok、Kathmandu、Nuwakot、Rasuwa、Dhading、Gorkha、Tanahu和Makwanpur等10个县的91个调查点,

以及阿尼哥公路、沙拉公路及其他生命线工程30个,累计调查行程约12000 km。在建筑物震害调查中发现,Sindhupalchok县首府Chautara、Dolakha县首府Charikot以及Singati(分别称为调查点1、2和3)的部分钢筋混凝土(RC)框架结构震损严重,少数倒塌。这些RC框架的震害呈现一定共性,其结构受力特点与我国RC框架类似。故针对这三处调查点的框架震害进行介绍及探讨,以期为提高我国RC框架抗震性能及防灾能力提供参考。



图1 尼泊尔8.1级地震, Ms6.0级以上余震^[1]及调查点分布

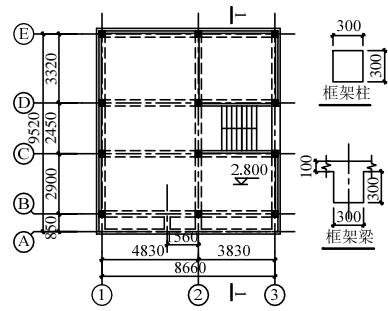
Fig.1 Distribution of the mainshock & aftershocks greater than Ms 6.0 and the investigate points of Nepal Ms 8.1 earthquake

1 调查点钢筋混凝土框架结构简介

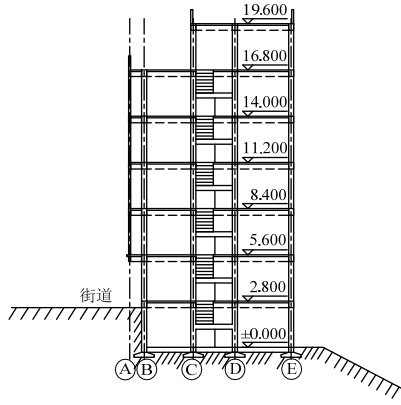
在三个调查点共计抽查了51栋RC框架房屋,并在Charikot镇的同一条街上选取了6栋房屋进行尺寸量测。除Sindhupalchok District医院为正规抗震设计建造外,其余建筑为自建房屋。此类房屋具有以下特点:由业主自行建造,未经过正规设计;房屋平面尺寸通常为长9 m~20 m,宽6 m~12 m,柱距为2 m~5 m,层高为2.7 m~3.3 m,层数为3层~7层;采用独立基础,设有基础梁;RC柱、梁、楼板为现浇施工,待框架拆模后嵌砌120 mm~240 mm厚的粘土砖填充墙。图2为Charikot镇(调查点2)一栋典型的自建RC框架二层平面图。常见的自建框架柱截面如图3所示,全柱箍筋间距相同,无加密区。框架梁通常与柱同宽,梁高在300 mm~450 mm。填充墙与框架间无拉结措施^[2]。回弹仪实测显示,混凝土立方体强度平均值在18 N/mm²~

22 N/mm²。沿街建造的框架结构,相邻建筑通常紧密相连,少数房屋留有1 m左右的空间作过道。沿山坡建造的房屋二层地面通常与街道同一标高(图2(b))。临街建筑的临街楼层为商铺,面街一侧填充墙较少。

尽管被调查框架结构缺乏一些抗震措施,但基本建造方式和受力模式与我国RC框架大体相同,因此震害经验也可为我们提供借鉴。



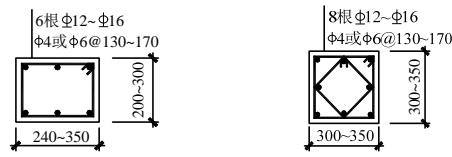
(a) 二层平面示意图



(b) 1-1 剖面示意图

图 2 调查点 2(Charikot) 框架 E 结构示意图

Fig.2 Layout of frame E in Charikot (investigation site 2)



(a) 常见配筋形式 (b) 少数新建结构柱配筋形式

图 3 自建框架典型柱配筋示意图

Fig.3 Typical RC columns reinforcement in Nepal

2 RC 框架结构的典型震害

2.1 Sindhupalchok District 医院

位于调查点 1, 正规设计建造的 RC 框架, 由 1 栋三层、2 栋二层建筑组成。整体结构判断为中等破坏^[3], 其中图 4(a)中右侧为二层建筑, 震害偏重。现场测量显示, 框架柱截面尺寸为 500 mm×500 mm, 一个露筋的角柱配置了 12 根直径 20 mm~25 mm 的纵筋, 井字箍, 箍筋直径为 10 mm~12 mm,



(a) Sindhupalchok District 医院



(b) 一层框架柱震损



(c) 与小开洞填充墙相邻的柱顶剪切破坏



(d) 与无开洞填充墙相邻的柱顶剪切破坏



(e) 一层填充墙严重破坏, 局部倒塌



(f) 女儿墙及顶梁无拉结, 整体掉落

图 4 Sindhupalchok District 医院典型震害

Fig.4 Seismic damages of Sindhupalchok District Hospital
间距 150 mm。一层多数框架柱端混凝土开裂及压碎(图 4(b)); 未发现框架梁震损; 少数与未开洞或小开洞填充墙相邻的框架柱以及少数楼梯间框架柱柱顶剪切破坏(图 4(c)、图 4(d)); 二层结构构件震损相对较轻; 一层填充墙普遍严重开裂, 少数局部倒塌(图 4(e)), 屋顶女儿墙明显破坏, 多处女儿墙及顶梁掉落(图 4(f))。

2.2 自建 RC 框架结构典型震害

三个调查点均有少数自建框架结构发生整体倒塌，主要表现为底层或与街道同高的楼层坐层(图 5、图 6(a)、图 6(c))；因相邻房屋的碰撞造成坐层或侧向倒塌(图 6(b))；结构整体倒塌(图 7)。

三个调查点部分框架结构呈现严重破坏和中等破坏，主要表现为薄弱层柱端震损，填充墙开裂、墙体局部倒塌(图 8、图 9)；个别在建框架尚未砌筑填充墙，薄弱层层间侧移很大，濒临倒塌(图 10)。



(a) 2015 年 5 月 12 日 Ms7.5 余震之前严重破坏



(b) Ms7.5 余震后倒塌

图 5 Chautara(调查点 1)某自建框架震害(照片由房主提供)

Fig.5 Seismic damage of a non-engineered RC frame in Chautara (investigation site 1, photos by the building owner)



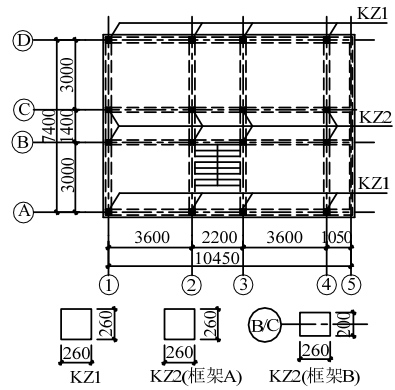
(a) 严重破坏(A)和坐层(B)的框架



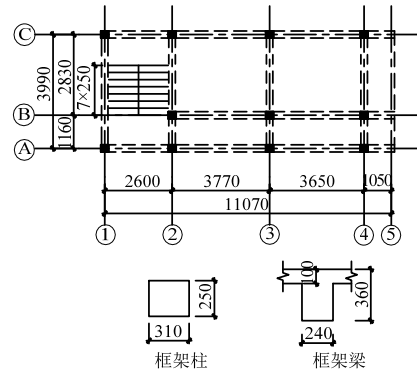
(b) 坐层(B)和碰撞倒塌(C)的框架



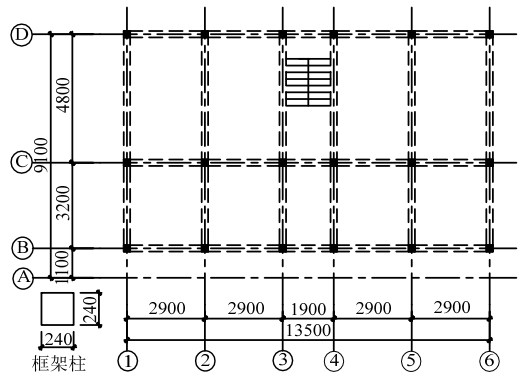
(c) 二层坐层的框架(D)



(d) 框架 A、B 结构平面



(e) 框架 C 结构平面



(f) 框架 D 结构平面

图 6 Charikot(调查点 2)倒塌及严重破坏的框架
Fig.6 Collapsed & severely damaged frames in Charikot (investigation site 2)



(a) 框架整体



(b) 节点①



(c) 节点②

图7 Singati(调查点3)垮塌的RC框架

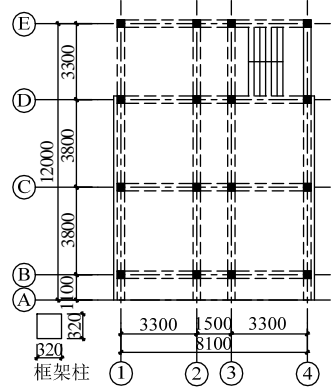
Fig.7 Overall collapsed frame in Singati (investigation site 3)



(a) ④轴侧面



(b) 二层D轴-①, ②轴部分



(c) 二层结构平面示意

图9 Charikot(调查点2)严重破坏框架F

Fig.9 Severely damaged frame F in Charikot (investigation site 2)



(a) ①轴侧面



(b) ③轴侧面



(c) ②轴-B轴二层柱



(d) ③轴-E轴一层顶节点

图8 Charikot(调查点2)中等破坏框架E(结构布置见图2)

Fig.8 Moderately damaged frame E in Charikot (investigation site 2, plan view in fig.2)



图10 Singati(调查点3)严重破坏的RC框架

Fig.10 Severely damaged RC frame in Singati (investigation site 3)

部分自建 RC 框架结构中, 未开洞或小开洞填充墙相邻的框架柱顶出现剪切破坏。这一破坏现象在多个调查点的框架结构中均可见到, 如图 11。



(a) Charikot 某框架剪切破坏柱



(b) Singati(调查点 3)2 个结构的剪切破坏柱

图 11 自建框剪柱的剪切破坏

Fig.11 Shear damaged columns of non-engineered RC frame

3 讨论

3.1 框架结构关键指标与抗倒塌能力

对调查点 2(Charikot 镇)测量建筑尺寸的 6 栋房屋, 给出了震损程度判断^[3]和震害指数^[4-5], 并估算了结构薄弱层的柱平均轴压比^[6]和刚重比^[7], 见表 1 及图 12、图 13。计算轴压比和刚重比时, 荷载采用我国规范设计值, 混凝土按照设计强度等级 C20 计算; 楼层刚度计算时楼盖体系近似按照刚体考虑, 由于部分倒塌房屋薄弱层填充墙布置已无法辨认, 考虑到薄弱层填充墙通常较少, 且严重破坏至倒塌阶段填充墙大都破坏严重, 故刚度计算未考虑填充墙贡献。

6 栋房屋均位于同一条街道且相邻或相距不远, 因此其破坏情况和结构指标具有一定的可比性。从图 12 可见, 框架柱平均轴压比和震害指数大体成正比, 柱平均轴压比较大的结构震害更重。

轴压比的增大导致框架柱的延性显著降低, 使柱的水平承载力和竖向承载力在侧移增大时更早地下降, 从而降低了结构的抗倒塌能力, 因此在框架结构的概念设计阶段, 将框架柱的轴压比控制在较小范围内(如小于 $0.5^{[8-10]}$)是有效的防倒塌措施之一。

图 13 中, 结构 A 和 D 的柱平均轴压比均为 0.5, 破坏程度却存在明显差异。对此, 图 13 的刚重比趋势更为明显: 总体而言, 结构震害指数与刚重比成反比, 较小的刚重比说明薄弱层更为柔弱, 水平地震作用下可能出现更大的侧移, 同时受重力二阶效应的影响, 结构更容易遭受严重破坏甚至倒塌。结构 A 和结构 D 虽具有相同的柱平均轴压比, 但框架 A 柱截面尺寸为 $260\text{ mm}\times 260\text{ mm}$, 框架 D 为 $240\text{ mm}\times 240\text{ mm}$, 造成了结构刚重比的差异, 以及震损程度的不同。由此可知, 在轴压比相同情况下, 合理布置柱距, 使用尺寸更大的框架柱, 可获得较大的结构刚重比, 有利于增强结构的抗倒塌能力。

框架 C 的轴压比和刚重比指标均非最弱, 但震损程度却居 6 个框架之首, 缘于相邻 B 框架的碰撞作用。对此宜开展深入研究, 总结震害经验。

表 1 Charikot 典型 RC 框架震损程度及关键指标

Table 1 Indicators and damage levels of frames in Charikot

编号	层数	薄弱层	震损程度	震害指数	平均轴压比	刚重比
A	5	1	严重	0.8	0.5	49
B	5	1	倒塌	1	0.56	35
C	5(6)*	1	倒塌	1	0.41	52
D	5	2	倒塌	1	0.5	39
E	6(7)*	2	中等	0.55	0.42	74
F	7	2	严重	0.65	0.44	68

注: *楼梯间处局部多出一层

3.2 填充墙对 RC 框架抗震性能的影响

嵌砌于框架中的填充墙与框架协同变形受力, 增加了 RC 框架结构的抗侧刚度和水平承载力。调查点很多填砌粘土砖墙的 RC 框架, 填充墙震损相对较重, 框架柱震害则相对较轻(图 8)。少数未砌筑填充墙的在建框架则出现了严重的柱端震损和结构侧移(图 10)。但调查点一些 RC 框架结构出现了框架柱顶端严重剪切破坏, 墙体震损偏轻的现象。原因在于水平地震作用造成结构侧移, 柱顶部角部墙体与框架柱接触, 墙体形成类似“斜撑”的作用, 框架柱在斜撑的支撑点上受到较大的水平力作用, 造成柱端剪切破坏, 如图 4、图 11 所示。图 11(a)中的框架, 在尚无肉眼可辨的残余侧移情况下, 柱端破坏程度明显重于图 10 明显侧移的框架柱。因

此过强的填充墙非但不能充分发挥耗能作用,反而会造成相邻框架柱的严重震损,威胁结构安全,降低结构的延性,增加结构的修复代价。在芦山地震、鲁甸地震震害调查中,此类震害同样多处可见(图14)^[11-14]。因此宜在设计阶段充分考虑填充墙引起的柱端附加剪力,可在结构设计中适当加大柱截面,增强柱端箍筋,定量的验算方法可参考抗震规范对于底框结构嵌砌砖墙框架的相关规定^[4];也可采取柔性连接措施^[15],避免填充墙与框架柱的强相互作用。



(b) 龙头山幼儿园底层框架柱(2014 鲁甸地震)

图 14 我国框架柱顶剪切破坏典型震害

Fig.14 Shear failure RC frame columns in China in recent earthquakes

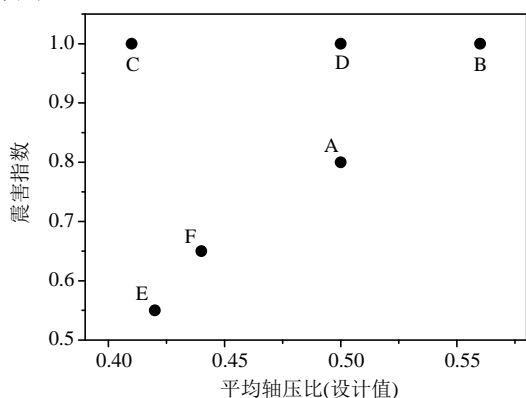


图 12 平均轴压比与震害指数关系

Fig.12 Relationship between averaged axial compression ratio and damage index of 6 RC frames

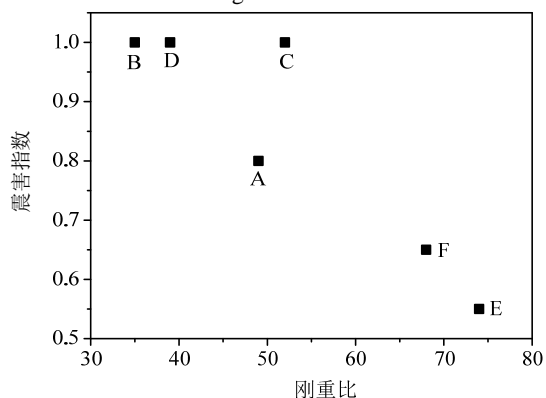


图 13 刚重比与震害指数关系

Fig.13 Relationship between stiffness to weight ratio and damage index of 6 RC frames



(a) 龙门中学一层角柱(2013 芦山地震)



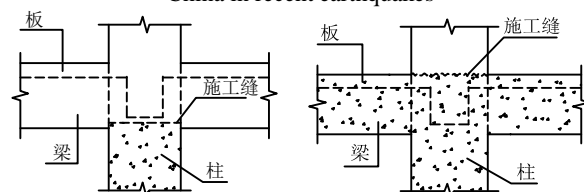
(b) 龙头山烟草局一层角柱(2014 鲁甸地震)

图 15 我国框架结构底层柱顶施工缝典型震害

Fig.15 Construction joint damage of RC frame columns in China in recent earthquakes



(a) 上里中学底层框架柱(2013 芦山地震)



(a) 施工缝位于梁底(传统) (b) 施工缝位于板顶(建议)

图 16 柱顶施工缝示意图

Fig.16 Construction joint of RC frame columns

3.3 框架柱的关键抗震措施和施工构造

调查点的 RC 框架柱, 箍筋直径以 6 mm 居多, 间距在 130 mm~170 mm, 整个柱子通长不变, 不满足我国抗震规范关于柱端和节点核心区的箍筋直径(不小于 8 mm)和加密措施(不大于 100 mm)的要求^[4], 部分框架柱端延性较差或剪切破坏(图 4(c)、图 4(d), 图 11)。部分框架的节点核心区缺少箍筋甚至未设置箍筋, 轻则节点破坏(图 8(d)、图 10), 重则结构倒塌(图 7(b)、图 7(c))。因此严格的箍筋加密加强措施是结构抗震性能的重要保证。

与我国部分施工做法相似, 尼泊尔的自建框架柱施工缝多设置在梁底以上 20 mm~30 mm 处(图 16(a)), 但上部混凝土浇筑前施工缝往往未做任何处理, 人为形成柱端薄弱层(图 7(c))。地震发生时裂缝首先沿施工缝发展, 削弱了构件的抗震能力。框架结构的底层往往较为薄弱, 底层柱顶则可能成为整体结构的薄弱区。尽管我国混凝土结构工程施工规范规定了施工缝结合面的凿毛清理等措施^[16], 但柱顶节点区域钢筋密布, 凿毛清理工作难度较大, 且即便施工缝清理干净, 仍较为薄弱。芦山地震、鲁甸地震后, 柱顶施工缝处的破坏多处可见(图 15)^[11-12]。因此建议框架结构底层柱顶的施工缝宜设置在楼盖顶平面处, 如图 15(b)所示, 避免底层柱顶因施工缝造成削弱。

3.4 非结构构件的抗震构造措施

与我国常用抗震构造措施相比, 调查点的 RC 框架结构, 填充墙、女儿墙等非结构构件的拉结构造设置不足, 震害现象从反面表明了非结构构件设置抗震构造措施的必要性: 抗震规范明确规定了连接填充墙和框架的拉结构造^[4], 标准图集《砌体填充墙结构构造》^[17]建议在砌体隔墙的墙角、纵横墙交接处设置构造柱, 并设置拉筋与墙体拉结。图 7(a)、图 9(a)中的填充墙均未设置拉结构造, 墙体出现坍塌; 图 4(e)中的角部墙体缺少构造柱和拉结筋, 简单的单根钢筋拉结措施无法保证墙体稳定, 一层局部倒塌, 二层局部濒临倒塌。抗震规范规定了 6 度~8 度设防时无锚固砌筑女儿墙的高度限值为 0.5 m, 超高的女儿墙应进行锚固^[4], 砌体结构设计规范则规定了砌筑女儿墙应按要设置构造柱、拉结筋, 并与压顶梁整浇^[18], 图 4(g)中的女儿墙明显超高, 未设置任何拉结构造, 因此普遍破坏较重, 多处压顶梁掉落。

3.5 RC 框架结构震后应急期间的安全鉴定

主震发生后, 震区大量房屋面临着余震威胁和居住需求, 应急期间的建筑安全鉴定显得重要而紧迫。美国、日本、中国均发布了针对性的规范或技术指南^[19-22]。鉴定工作一般在救灾指挥部判断预期余震作用不大于主震后, 技术人员依据建筑物的震损情况综合评估其经受余震时的安全性。而本次尼泊尔地震的余震分布和调查点的结构震害情况, 则为应急期间的建筑物安全鉴定提出了严峻要求。

尽管本次地震余震震级均小于主震, 但主震后第 17 天发生的 7.5 级余震震中距主震震中约 145 km, 且震源深度较主震更浅。图 1 右侧余震周围的房屋建筑很可能在余震中遭受了强于主震的地震作用。对当地居民的采访显示, 3 个调查点大部分倒塌的 RC 框架均是在 2015 年 5 月 12 日 7.5 级余震中受到致命一击(图 5、图 6)。图 6 中的框架 C 在 2015 年 5 月 12 日的余震中侧向倒塌, 导致 2 人死亡 1 人受伤。

鉴于余震影响的不确定性较大, 对于应急期间的 RC 框架结构房屋安全鉴定, 尚应尽量确保被鉴定建筑具有一定的延性和抗倒塌能力, 以及非结构构件具有较好的稳定性, 以此降低可能出现的强余震危险。由此提出以下建议:

1) 对结构的受力体系布置合理性、结构整体的延性和抗倒塌能力进行初步判断, 若结构存在明显不合理的受力体系, 关键受力构件或结构体系存在脆性破坏的危险, 即使整体结构的震损程度较轻, 也应慎重判定;

2) 重视非结构构件的威胁。对于被鉴定建筑内部, 以及可能影响出入口附近安全的非结构构件进行核查。除明显震损的非结构构件外, 尚应核查其他非结构构件的牢固性和拉结构造情况, 评估其在余震中倒塌掉落的可能, 并提出针对性的措施, 如临时支撑、拉结、拆除, 暂时封锁可能受到威胁的区域和通道;

3) 检查被鉴定房屋或地区的周围建、构筑物震损情况, 谨慎评估余震中的碰撞、倒塌和掉落威胁, 并采取必要的措施, 如临时支撑、封锁危险区域, 设立警示标识, 当毗邻建筑震损严重, 有可能在余震中倒塌相撞时, 宜判定为暂不使用。

鉴于影响结构余震安全的因素众多, 深入的研究工作有待进一步开展。

4 结论

尼泊尔 8.1 级地震及部分余震发生后,对尼泊尔东南部三个城镇的震害调查表明,当地的 RC 框架结构多数明显震损,部分严重破坏,少数整体垮塌。震害主要表现为底层或临街楼层(街道高于底层时)框架柱压弯破坏,填充墙倒塌,柱顶水平施工缝处破坏,部分紧邻填充墙的柱顶部剪切破坏,屋顶女儿墙震损掉落。

基于震害调查,同时对比我国 RC 框架的抗震措施及以往震害可知:减小框架柱轴压比是有效的抗倒塌措施;在相同轴压比下,合理调整柱距,选取更大的柱截面尺寸有利于提高结构抗倒塌能力;填充墙为 RC 框架提供附加水平承载力的同时,增大了毗邻柱顶的剪力,可能导致柱顶发生剪切破坏,对此宜在结构设计中通过适当加大柱截面,增强柱端箍筋的方法考虑填充墙附加剪力的不利影响;框架柱塑性铰区和节点区配箍不足直接导致结构的抗震性能减弱;将薄弱层框架柱顶的水平施工缝设置在梁底可能削弱框架柱的抗震性能,宜将施工缝设置在板顶;构造拉结措施是非结构构件地震安全的重要保证,缺少构造拉结措施的非结构构件震损严重。

调查点部分 RC 框架在余震中倒塌伤人的事实表明,震后应急期间 RC 框架结构的安全鉴定工作事关重大,应谨慎检查房屋结构的震损情况、非结构构件的震损、拉结构造以及相邻建(构)筑物的震损情况,并对余震期间可能出现的危险情况进行判断,谨慎给出鉴定结论。

参考文献:

- [1] 中国地震局. 中国地震台网—历史地震[DB]. <http://www.ceic.ac.cn/onmap/id:9>, 2015.7.10.
China Earthquake Administration. China Earthquake Network Center—historical earthquakes [DB]. <http://www.ceic.ac.cn/onmap/id:9>, 2015.7.10.
- [2] Yukta Bilas Marhatta, Jitendra K Bothara, Meen Bahadur Magar, Gopal Chapagain. Housing report pillar walaghar (URM infilled RC frame buildings) [R]. World Housing Encyclopedia, 2007.
- [3] GB/T 24335-2009, 建(构)筑物地震破坏等级划分[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
GB/T 24335-2009, Classification of earthquake damage to buildings and special structures [S]. Beijing: China Standards Press, 2009. (in Chinese)
- [4] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 第 2 版. 北京: 地震出版社, 2006: 44—53.
- Hu Yuxian. Earthquake engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2006: 44—53. (in Chinese)
- [5] 欧进萍, 何政, 吴斌, 邱法维. 钢筋混凝土结构基于地震损伤性能的设计[J]. 地震工程与工程震动, 1999, 19(1): 21—30.
Ou Jinping, He Zheng, Wu Bin, Qiu Fawei. Seismic damage performance-based design of reinforced concrete structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999, 19(1): 21—30. (in Chinese)
- [6] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [7] JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
JGJ3-2010, Technical specification for concrete structures of tall building [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [8] 施炜, 叶列平, 陆新征, 唐代远. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 41—48.
Shi Wei, Ye Lieping, Lu Xinzheng, Tang Daiyuan. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 41—48. (in Chinese)
- [9] 唐代远, 陆新征, 叶列平, 施炜. 柱轴压比对我国 RC 框架结构抗地震倒塌能力的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(5): 26—35.
Tang Daiyuan, Lu Xinzheng, Ye Lieping, Shi Wei. Influence of axial compression ratio to the seismic collapse resistance of RC frame structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(5): 26—35. (in Chinese)
- [10] 马玉虎, 陆新征, 叶列平, 唐代远, 李易. 漩口中学典型框架结构震害模拟与分析[J]. 工程力学, 2011, 28(5): 71—77.
Ma Yuhu, Lu Xinzheng, Ye Lieping, Tang Daiyuan, Li Yi. Seismic damage simulation and analysis of typical RC frames of XuanKou school [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 71—77. (in Chinese)
- [11] 孙柏涛, 闫培雷, 王明振, 等. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震建筑物震害图集[M]. 北京: 地震出版社, 2014: 189—190.
Sun Baitao, Yan Peilei, Wang Mingzhen, et al. Atlas of Sichuan province Lushan ‘4·20’ 7.0 violent earthquake damage [M]. Beijing: Seismological Press, 2014: 189—190. (in Chinese)
- [12] Lin Xuchuan, Zhang Haoyu, Chen Hongfu, Chen Hao, Lin Junqi. Field investigation on severely damaged aseismic buildings in 2014 Ludian earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(1): 169—176.

- [13] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(12): 102—113.
Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on weak beam-strong column design method of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 102—113. (in Chinese)
- [14] 黄思凝, 郭迅, 孙得璋, 孟庆利. 轻质填充墙框架结构抗震性能的振动台试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(9): 182—189, 202.
Huang Sining, Guo Xun, Sun Dezhang, Meng Qingli. Shaking table seismic teston performance of frame-structure with light-weight infilled walls [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(9): 182—189, 202. (in Chinese)
- [15] 12G614-2, 砌体填充墙结构构造[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
12G614-2, Construction of masonry infill wall [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [16] GB50666-2011, 混凝土结构工程施工规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
GB50666-2011, Code for seismic design of masonry structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 12G614-1, 砌体填充墙结构构造[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
12G614-1, Construction of masonry infill wall [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)
- [18] GB50003-2001, 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GB50003-2001, Code for seismic design of masonry structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [19] ATC20-1, Field manual: post earthquake safety evaluation of buildings (second edition) [S]. Applied Technology Council (America), 2005.
- [20] 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針[S]. 東京: 日本建築防災協会, 1991.
Guideline for Post-earthquake damage evaluation and rehabilitation [S]. Tokyo: The Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), 1991. (in Japanese)
- [21] 建标[2008] 132 号, 地震灾后建筑鉴定与加固技术指南[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2008.
Document [2008] 132, Technical guide for post earthquake safety evaluation and retrofit of buildings [S]. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China, 2008. (in Chinese)
- [22] GB18208.2-2001, 地震现场工作第二部分: 建筑物安全鉴定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
GB18208.2-2001, Post-earthquake field works- Part 2: Safety assessment of buildings [S]. Beijing: Standards Press of China, 2001. (in Chinese)

(上接第 58 页)

- [8] 张彦玲. 钢-混凝土组合梁负弯矩区受力性能及开裂控制的试验及理论研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
Zhang Yanling. Theoretical analysis and experimental research on behavior and crack control of negative moment zone in steel-concrete composite beams [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [9] 李法雄. 组合梁斜拉桥空间受力行为及时变效应[D]. 北京: 清华大学, 2011.
Li Faxiong. Spatial structural behavior and time-dependent analysis of composite cable stayed bridge [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese)
- [10] 程海根, 强士中. 钢-砼组合箱梁考虑滑移时剪力滞效应分析[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 49—52.
Cheng Haigen, Qiang Shizhong. Analysis of shear-lag effect of steel-concrete composite box girder considering slip effect [J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 49—52. (in Chinese)
- [11] Dezi L, Gara F, Leoni G. Shear-lag effect in twin-girder composite decks [J]. Steel Composite Structures, 2003, 3(2): 111—122.
- [12] 王磊, 李家宝. 结构分析的有限差分法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 12—28.
Wang Lei, Li Jiabao. Finite difference method of structural analysis [M]. Beijing: China Communications Press, 1982: 12—28. (in Chinese)
- [13] ANSYS. Release 13.0 documentation for ANSYS [M]. Pittsburgh: ANSYS, Incorporation, 2010: 6—407.