

汶川地震钢筋混凝土框架结构震害调查与启示

霍林生^{*1}, 李宏男¹, 肖诗云¹, 王东升²

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为进一步理解汶川地震中一些钢筋混凝土框架结构的破坏原因, 根据汶川地震后框架结构震害调查资料, 对照《建筑抗震设计规范》所规定的抗震设计原则, 对框架结构中的一些典型震害现象及其产生原因进行了总结与分析, 主要包括防震缝处的震害, 结构竖向刚度、强度不均匀产生的震害, 框架梁、柱及节点处的震害, 围护结构与填充墙处的震害及楼梯震害. 在对震害现象及其产生原因详细分析的基础上, 给出了加强框架结构安全性的措施. 所得分析结果可为框架结构抗震设计及有关的规范修订提供参考, 以保证框架结构在地震中达到“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的三水准设防目标.

关键词: 汶川地震; 框架结构; 震害调查

中图分类号: TU312.3; P315 **文献标志码:** A

0 引言

2008年5月12日发生的四川省汶川8.0级大地震, 导致大量建筑破坏倒塌和重大人员伤亡. 此次地震中除个别钢筋混凝土框架结构因施工质量很差、结构布置过于复杂等原因发生严重破坏、甚至倒塌外, 大多数框架结构表现出良好的抗震性能. 尽管如此, 框架结构中所表现出的一些震害现象仍然值得深思. 例如, 抗震规范要求的“强柱弱梁、强剪弱弯、强节点弱构件”等设计理念在此次地震中没有实现, 大量框架结构柱端出现塑性铰^[1,2]. 填充墙在工程设计中尽管往往被视为“非结构”构件, 但震害表明, 填充墙实际上参与了结构体系的地震剪力分配, 并与框架结构之间存在复杂的相互作用. 填充墙的刚度效应可能导致填充墙框架结构在地震作用下发生软弱层破坏或扭转破坏, 从而引起结构严重受损甚至倒塌. 填充墙沿竖向分布不均匀时, 由于填充墙的刚度效应往往会在填充墙布置较少的楼层产生沿竖向的软弱层. 窗间墙对框架柱的约束造成的短柱效应、剪力重分配和破坏截面转移等不利影响也成为填充墙

框架结构地震破坏的常见原因. 震害调查中还发现, 在实际施工时, 为了立面上的美观等原因, 建筑结构设置的防震缝宽度不够或者在防震缝两侧采用刚性材料来填充防震缝, 这样就使地震时防震缝两侧塔楼的水平位移受到很大限制并导致两侧墙体的严重损坏. 此外, 框架结构中楼梯破坏也是此次地震中发现的一个新问题. 本文对汶川地震中框架结构所呈现的震害现象进行总结, 希望能得到一些有益的启示, 供工程技术人员在今后进行结构抗震设计时参考.

1 防震缝处的震害

建筑及其抗侧力构件的平面布置宜规则、对称, 并应具有良好的整体性. 建筑物的平面布置不对称会造成刚度或质量平面内的不均匀分布, 在水平地震作用下, 发生平移与扭转耦联的空间振动, 从而加重结构破坏程度. 因此, 现行《建筑抗震设计规范》(以下简称《规范》)规定, 对于体形复杂、平立面特别不规则的建筑结构, 可按实际需要在适当部分设置防震缝, 将结构划分成多个较规则的抗侧力单元^[1]. 但是《规范》中指出对于高层

收稿日期: 2009-04-20; 修回日期: 2009-08-10.

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助项目(B08014); “十一五”国家科技支撑计划重大资助项目(2006BAJ03A03); 地震行业科研专项资助项目(200808074).

作者简介: 霍林生^{*}(1975-), 男, 博士, 副教授; 李宏男(1957-), 男, 博士, 长江学者奖励计划特聘教授, 博士生导师.

钢筋混凝土房屋尽量不设防震缝.这是因为,在防震缝两侧的结构单元各自的振动特性不同,地震时会产生相对位移,如果防震缝的宽度不够,则结构相邻单元之间会发生碰撞而产生震害.《规范》中对于框架结构中设置防震缝的宽度要求为“当高度不超过15 m时可取70 mm;超过15 m时,6度、7度、8度和9度时相应每增加5 m、4 m、3 m和2 m,宜加宽20 mm”.但是,实际震害调查中发

现,很多建筑结构防震缝设置宽度不够,有些建筑结构的防震缝被刚性杂物填充,从而导致地震中防震缝处的碰撞破坏.图1给出了结构体形为“L”形的成都市某高层建筑在地震过程中,防震缝两侧发生的碰撞造成的防震缝的破坏.图2为绵竹市绵竹中学综合楼,在防震缝处可看到明显的碰撞破坏现象,同时屋顶女儿墙在防震缝处由于碰撞开裂.

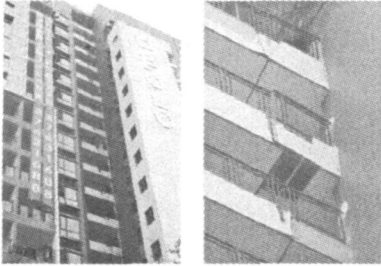
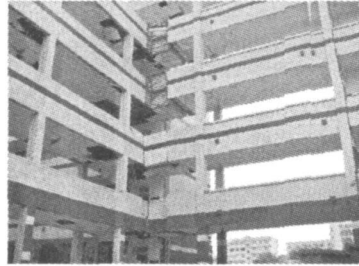
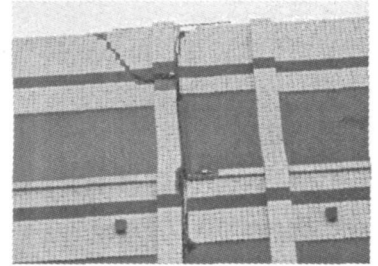


图1 成都市某不规则建筑
Fig. 1 An irregular building
in Chengdu City



(a)



(b)

图2 绵竹市绵竹中学综合楼

Fig. 2 The complex of Mianzhu Middle School in Mianzhu City

2 结构竖向刚度、强度不均匀产生的震害

当结构沿高度方向的刚度或强度突然发生较大的变化时,即在刚度或强度较小的楼层形成薄弱层.在地震作用下,整个结构的变形都集中在该楼层,可能会导致结构发生严重破坏甚至倒塌.位于都江堰市临湖别墅小区的一个6层框架结构(图3(a)),柱截面尺寸分为400 mm×400 mm、400 mm×500 mm、450 mm×450 mm、450 mm×650 mm四种类型,配箍形式分为拉结筋和复合箍筋,箍筋直径为10 mm,间距基本为100 mm,箍筋弯钩长度在100 mm以上,配箍基本满足现行《规范》要求.该结构底层作为停车场,未设置填充墙,而上部楼层作为宾馆客房,设置了大量的填充墙.由于结构底层刚度相对较小,而上部楼层的刚度显著增大,在底部形成柔性层,导致底层发生局部屈服机制破坏,所有底层框架柱上下端都出现塑性铰,残余变形约300 mm.该结构第二层个别填充墙体有轻微裂缝,第三层以上各层未见明显裂缝,说明上部结构层间变形很小.文献[3]利用有限元方法,分别分析了考虑填充墙和不考虑填充墙时该结构的特性.结果表明,该结构如按纯框架结构进行分析,可以实现“强柱弱梁”屈服机制,但若将填充墙纳入整体结构分析模型中考虑

进行计算,则形成底层屈服机制,与震害情况一致.因此,在设计中,应将填充墙作为整体结构抗震的一个重要构件,并在结构抗震分析中给予必要的考虑.如结构分析中不考虑填充墙的影响,则应在构造措施上隔离填充墙对主体结构的影响,使结构实际受力状况与结构分析模型一致.

同样,北川县北川大酒店内一框架结构,中间层没有填充墙而形成薄弱环节,地震后结构接近倒塌(图3(b)).



(a) 都江堰市某框架结构底部



(b) 北川大酒店某建筑

图3 薄弱层破坏

Fig. 3 Damage in weak layers

3 框架梁、柱及节点的震害

地震中框架梁的震害相对较轻,主要表现在两端、节点区附近产生的竖向裂缝或斜裂缝,在梁负弯矩钢筋折断处由于抗弯能力削弱也容易产生裂缝,造成剪切破坏.个别框架梁会由于主筋屈服、混凝土压碎而出现弯曲破坏形态.图4(a)和(b)为梁的剪切破坏,梁端呈现明显的剪切斜裂缝;图4(c)为梁的弯曲破坏,梁端形成塑性铰,主筋屈服、外露;图4(d)为梁的剪弯破坏,梁中同时出现弯曲裂缝与剪切裂缝.

地震中柱顶的几种破坏形式如图5所示.由于节点处柱端的内力比较大,在弯矩、剪力和压力的联合作用下,柱顶周围出现水平裂缝、斜裂缝或交叉裂缝,严重时混凝土压碎或剥落,纵筋屈服成塑性铰破坏(如图5(a)和(b)所示),这种破坏形

式属于延性破坏,可能吸收较大的地震能量.当轴压比较大、箍筋约束不足、混凝土强度不足时,柱端混凝土会压碎而影响抗剪能力,柱顶会出现剪切性破坏(如图5(c)和(d)所示).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(如图5(e)和(f)所示).另外,由于柱顶配箍不足或没有箍筋而发生了脆性剪切破坏(如图5(g)和(h)所示).

柱底的震害主要表现为柱底混凝土保护层部分脱落,柱主筋及其箍筋部分外露,底层柱倾斜,水平裂缝和斜裂缝互相交叉,破坏区混凝土剥落(如图6所示).柱底产生的震害大部分是因为结构中存在着薄弱层,地震时由于薄弱层变形过大而在柱底形成塑性铰破坏.

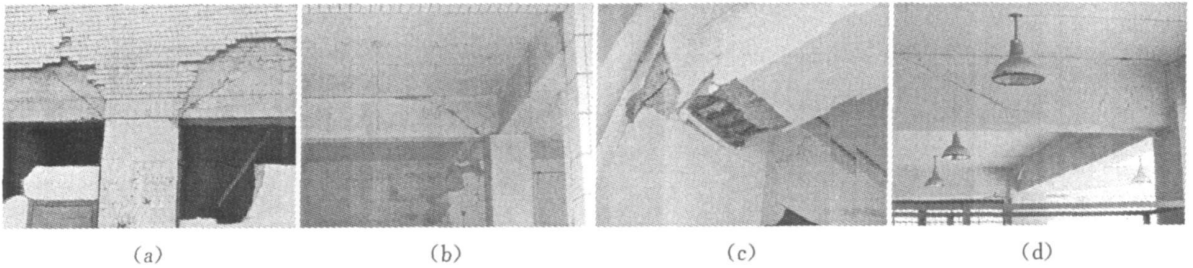


图4 框架结构梁的破坏形态

Fig. 4 Damaged forms of beams in frame structures

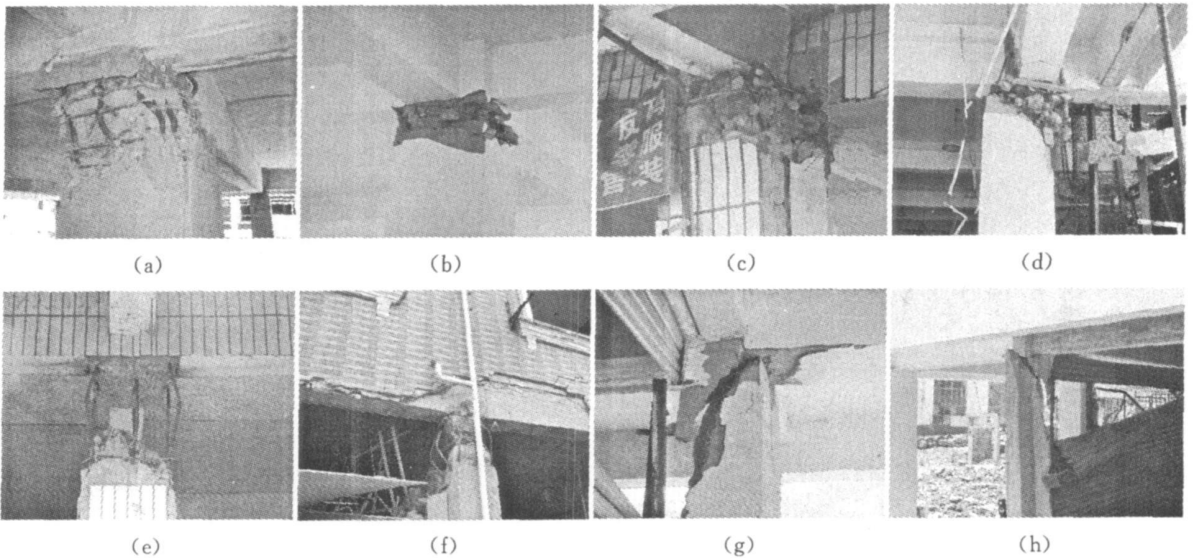
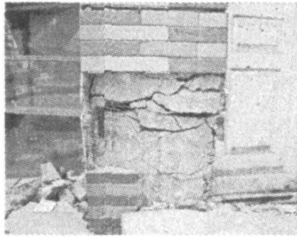


图5 柱顶的震害现象

Fig. 5 Damaged forms on the top of columns

在多高层结构设计时,应尽可能避免短柱,其主要目的是使同层各柱在相同水平位移时,能同时达到最大承载力^[4].实际结构中,由于设置半高

的填充墙或窗间墙,形成短柱.短柱的刚度大,吸收较大的地震剪力而发生剪切破坏(图7).



(a)



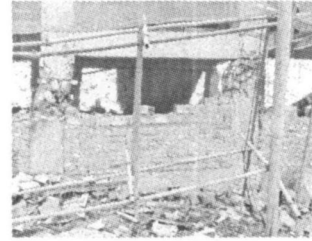
(b)

图 6 柱底的震害

Fig. 6 Damaged forms on the bottom of columns

在地面运动反复作用下, 框架节点的机理十分复杂, 其破坏现象主要表现在: 节点核心区抗剪强度不足引起的剪切破坏, 破坏时, 核心区产生斜向对角的贯通裂缝, 节点区内箍筋屈服, 外鼓甚至崩断. 当节点区剪压比较大时, 箍筋可能并未达到屈服, 而是混凝土被剪压酥碎成块而发生破坏. 节点

核心区由于构造措施不当而引起的破坏主要表现在节点箍筋过少而产生的脆性破坏, 或由于核心区的钢筋过密而影响混凝土浇注质量引起剪切破坏(如图 8 所示). 类似的情况在 1997 年的伊朗大地震中也可见到^[9].



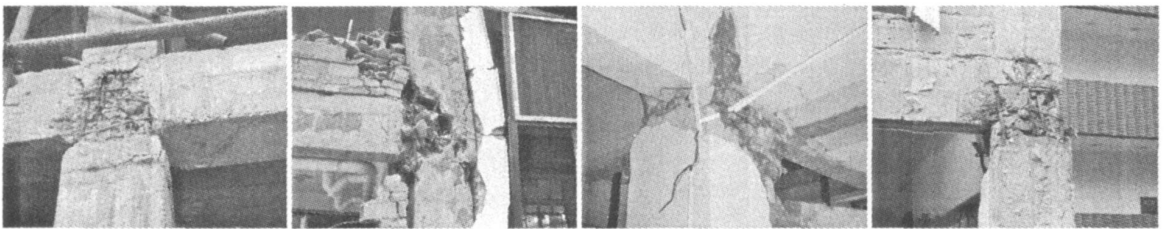
(a)



(b)

图 7 短柱破坏

Fig. 7 Damaged short columns



(a)

(b)

(c)

(d)

图 8 梁柱节点破坏

Fig. 8 Damaged nodes of columns

我国现行抗震设计规范中的一个基本原则是“强柱弱梁”, 即柱子不先于梁破坏, 因为梁的破坏是局部破坏机制, 而柱子破坏则危及整个结构的安全. “强柱弱梁”型框架结构在全部梁端出现塑性铰并迫使结构底部也出现屈服变形时, 结构才会破坏, 在此过程中, 大量的地震输入能量被弹塑性变形所消耗. 为保证框架结构“强柱弱梁”体系, 《规范》中规定, 对于一、二、三级框架的梁柱节点处, 除框架顶层和柱轴压比小于 0.15 者及框支柱的节点外, 柱端组合的弯矩设计值应符合下列要求:

$$\sum M_c = \eta_c \sum M_b \quad (1)$$

一级框架结构及 9 度时尚应符合

$$\sum M_c = 1.2 \sum M_{bua} \quad (2)$$

式中: $\sum M_c$ 为节点上下柱端截面顺时针或反时针方向组合的弯矩设计值之和; $\sum M_b$ 为节点左右梁端截面反时针或顺时针方向组合的弯矩设计值之和; $\sum M_{bua}$ 为节点左右梁端截面反时针或顺时针方向实配的正截面抗震受弯承载力所对应的弯矩值之和; η_c 为柱端弯矩增大系数, 一级取 1.4, 二级取 1.2, 三级取 1.1.

但是在此次汶川地震中, 即使严格按照《规范》设计的框架结构, 也大多呈现“强梁弱柱”的破坏形式, 框架柱的破坏明显要比梁严重, 主要原因

在于, 楼板空间作用以及楼板分布钢筋的作用, 以及实际设计中梁配筋经常存在超配的情况, 导致框架梁端截面的实际抗弯承载力大于不考虑楼板作用时的抗弯承载力。

4 围护结构和填充墙震害

汶川地震中, 框架结构的围护结构和填充墙发生明显的震害. 填充墙的震害主要表现在水平

或竖向墙体-框架界面裂缝(如图 9(a)所示), 斜裂缝(图 9(b)), 交叉斜裂缝(图 9(c)、(d)), 以及墙体由于缺乏可靠的连接而出现错位甚至倒塌(图 9(e)、(f)). 尽管这些部位的破坏不影响主体结构的使用, 但仍然会对人员安全造成威胁, 同时也造成很大的财产损失. 例如, 如图 9(f)所示, 围护结构倒塌压坏汽车, 造成财产损失的同时还可能带来人员伤亡。

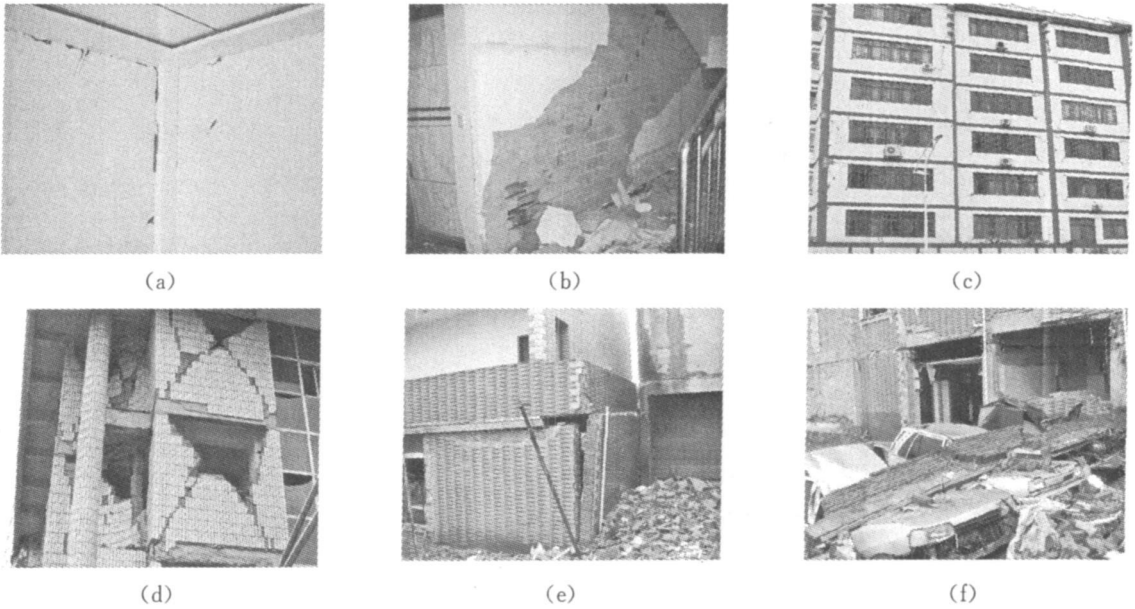


图 9 围护结构及填充墙震害

Fig. 9 Damaged enclosed walls and infills

5 楼梯震害

地震发生时, 楼梯是多层建筑中人群疏散的唯一通道, 但是本次地震中框架结构中的楼梯出现不同程度的破坏现象, 影响人员的逃生. 对于楼梯轻微破坏情况, 楼梯板出现多条水平裂缝, 平台梁板出现剪切裂缝; 震害严重者, 楼梯板完全拉断(图 10(a)), 楼梯梁在两端和跨中出现明显破坏, 钢筋暴露, 混凝土保护层压碎、剥落(图 10(b)、(c)、(d)). 以往的结构设计时没有考虑楼梯参与

抗震计算, 仅对楼梯进行静力分析和设计, 然后将楼梯作为荷载加到主体结构上, 对主体结构进行抗震计算分析. 事实上, 楼梯为框架结构提供了较大的抗侧移刚度, 从而会分担框架结构所承受的地震作用. 在水平地震的往复作用下, 楼梯板承受往复拉压作用, 楼梯梁和板由于承受弯矩、剪力和扭矩作用, 处于复杂的受力状态, 从而会导致楼梯梁在两端和跨中破坏, 混凝土酥碎, 钢筋扭曲变形。

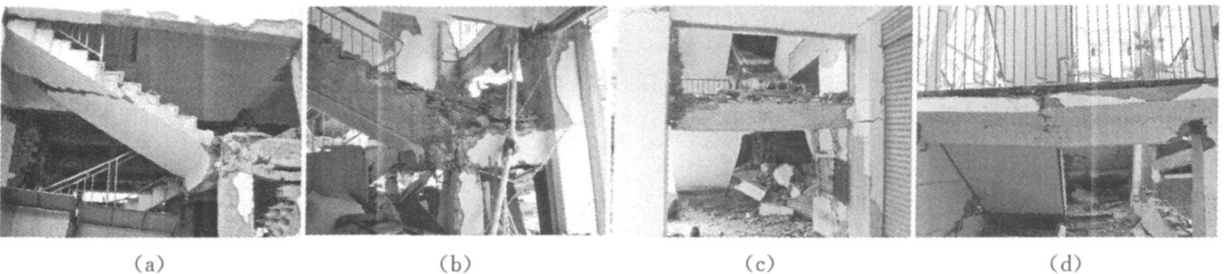


图 10 楼梯震害现象

Fig. 10 Damaged forms of stairs

6 结论与建议

(1)进一步深入研究能够实现框架结构“强柱弱梁”机制的设计方法和构造措施。框架结构中“强柱弱梁”是一种理想的屈服机制,它能够保证结构破坏时形成总体机制并具有足够的延性。但是,实际工程中,实现“强柱弱梁”的影响因素很多,应全面考虑这些影响因素,研究实现“强柱弱梁”的可行设计方法。

(2)正确认识非结构构件与主体结构之间的连接关系。此次地震中,不少建筑主体结构未发生严重破坏,但非结构构件,尤其是填充墙破坏严重,造成了一定的人员伤亡和财产损失。因此,要保证非结构构件与主体结构之间有可靠的连接。但是,填充墙的存在使得结构刚度在竖向分布不均匀并产生了严重震害,因而在结构设计时要充分考虑非结构构件与主体结构之间的实际受力状态,避免形成薄弱层。

(3)重视楼梯间的设计。以往在进行主体结构的抗震设计时不考虑楼梯与主体结构的相互作用,此次框架结构中楼梯破坏情况较多。因此,今后在框架结构的设计中应考虑楼梯对主体结构抗震性能的影响。

(4)要保证框架结构有多道抗震防线。框架结构中的填充墙,可作为第一道防线,在地震作用下首先破坏并消耗地震能量,以保证框架结构主体

的安全。对于空间较大的框架结构,如学校建筑,当填充墙较少时,可考虑柱间设置钢支撑作为第一道防线。

(5)高度重视结构施工,严防“偷工减料”及“豆腐渣”工程。震害分析结果也表明,只要严格按照规范设计并保证施工质量,框架结构是能够达到“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三水准设防目标的。

致谢:本次地震现场调查过程中得到了国家地震局工程力学研究所的大力支持,并得到了孙柏涛研究员、李山有研究员、戴军武研究员等的帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001
- [2] 王亚勇. 汶川地震建筑物震害启示——抗震概念设计[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 20-25
- [3] 叶列平, 曲哲, 马千里, 等. 从汶川地震中框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J]. 建筑结构, 2008, 38(11): 52-59
- [4] 李宏男. 建筑抗震设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1996
- [5] 李宏男, 刘志刚. 伊朗 Ardekul 地震震害考查[J]. 工程抗震, 1998(3): 39-43

Earthquake damage investigation and analysis of reinforced concrete frame structures in Wenchuan earthquake

HUO Lin-sheng^{*1}, LI Hong-nan¹, XIAO Shi-yun¹, WANG Dong-sheng²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024 China,

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026 China)

Abstract: To further understand the reasons of the damage of reinforced concrete frame structures during Wenchuan earthquake, some typical damaged appearances of frame structures are summarized and the reasons of damage are analyzed according to the rules described in the Code for Seismic Design of Buildings, including the damages around the aseismic joint, damages due to uneven distribution of stiffness or strength along vertical direction, damages in the beams, columns and nodes of frame structures, damages of enclosed walls and stairs. Based on the analysis results, some methods to enhance the safety of frame structures are proposed. The research results can provide a reference for seismic design of frame building structures and revision of corresponding codes and regulations so that the frame structure can achieve the seismic protective objective of undamage for small earthquake, repairable damage for moderate earthquake and uncollapse for severe earthquake.

Key words: Wenchuan earthquake; frame structures; earthquake damage investigation