

漩口中学建筑震害调查分析^{*}

叶列平, 李 易, 潘 鹏

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

[摘要] 介绍了位于汶川地震震中映秀镇漩口中学的建筑物震害情况, 包括 10 个 RC 框架结构和 4 个砖混结构。针对极震区同一场地情况下框架结构和砖混结构的震害调查分析, 提出了“巨震不塌”的目标, 并给出了提高结构抗巨震倒塌能力的措施和建议。

[关键词] 汶川地震; 框架结构; 砖混结构; 巨震不塌

Seismic damages of building structures of Xuankou Middle School in Yingxiu Town

Ye Lieping, Li Yi, Pan Peng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: It presents the seismic damages of building structures, including 10 frame and 4 masonry structures, in Xuankou Middle School during Wenchuan Earthquake. Based on the investigation of damage results, including total collapse, partially collapse and other damage degrees in the same magistoseismic site near epicentro, the seismic design objective of “collapse prevention in mega earthquake” is proposed. The suggestions to prevent collapse of building structures under mega earthquake are discussed.

Keywords: Wenchuan Earthquake; frame structure; masonry structure; collapse prevention in mega earthquake

1 漩口中学概况及总体震害情况

漩口中学位于 5#12 汶川大地震震中的映秀镇, 共有八栋建筑: 教学区楼群、办公楼、四栋教工宿舍、一栋学生宿舍和一个食堂(图 1)。其中, 教学区楼群又由七栋独立的结构组成, 包括三个教学楼 A, B, C, 两个角部教学楼 E, F, 一个阶梯教室和一个中央楼梯间, 均为框架结构。另外, 食堂、办公楼和教工宿舍 I 也是框架结构, 共有十个 RC 框架结构, 其他教工宿舍 L, M, N 和学生宿舍 J 均为砖混结构。

因漩口中学处于震中极震区, 遭遇烈度达 11 度, 震害比较严重。完全倒塌: 教学楼 A, B, 角部教学楼 E; 部分倒塌: 教学楼 C, 教工宿舍 I, 学生宿舍 J; 严重破坏: 角部教学楼 F, 办公楼, 阶梯教室, 中央楼梯间和食堂; 中等破坏: 教工宿舍 L, M, N。根据现场调查, 建筑倒塌是在余震中发生, 教工宿舍 I 和角部教学楼 F 在震后可能因爆破拆除而完全倒塌, 故未造成重大人员伤亡。

2 详细震害情况

2.1 教学区楼群

教学楼与中央楼梯间成回字形布置(图 1(b)), 形成中空活动内庭。教学楼 A, B, C 向回字形外侧倒塌。教学楼 A 底部 5 层和教学楼 B 底部 4 层完全倒塌, 顶层破坏严重。教学楼 C 底部 2 层完全倒塌, 上部 3 层严重倾斜。角部教学楼 E 完全倒塌, 而角部教学楼 F 在地震后未倒塌(图 1(a))。教师办公楼和中央楼梯间



图 1 漩口中学总体震害情况

未倒塌, 但损坏严重。以下详细介绍教学区楼群各部分框架结构的震害。

教学楼 A 为 5 层框架结构, 局部 6 层, 西侧为阶梯教室, 东侧为办公楼, 南面正对学校大门, 有楼梯大平台(图 2(a))。教室面南, 走廊面北。层 1~5 柱上下端出铰后折断导致整体向南偏东倒塌(图 2), 西侧因阶梯教室和楼梯大平台的支撑, 残留顶部层 6 和部分层 5(图 2(a)), 东侧的 5 层全部倒塌(图 2(b)), 与教学楼 A 相连的东侧办公楼也牵连受损。

教学楼 B 为 5 层框架结构, 走廊面南, 教室面北。层 1 向南偏东倒塌(图 3(a)), 层 2~4 向北坍塌, 层 5 残留, 但严重破坏(图 3(b))。

教学楼 C 为 5 层框架结构, 为楼梯间和卫生间, 走廊面东, 教室面西。层 1, 2 框架柱上下端出铰后折断

^{*} 建设部专题项目资助; 国家自然科学基金重点项目资助(90815025); 国家科技支撑计划课题(2006BAJ03A02)。

作者简介: 叶列平, 博士, 教授, 博导, Email: ylp@tsinghua.edu.cn。



图2 教学楼 A 的震害照片



图3 教学楼 B 震害照片

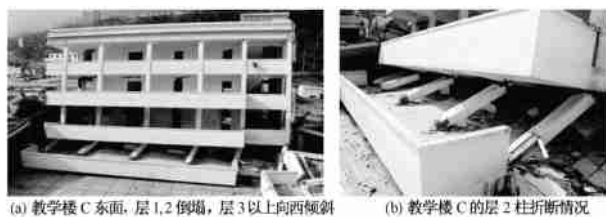


图4 教学楼 C 震害照片



图5 角部教学楼 E、F 震害照片

倒塌,层1 框架柱向东折断,层2 柱向西折断,见图4。

角部教学楼 F 与教学楼 A 在功能上为一体的教室,角部教学楼 E 与教学楼 C 在功能上也是一体的教室。震后角部教学楼 F 未倒塌(图 5(a)),后因破坏状况危险被爆破拆除(图 4(a) 左侧)。角部教学楼 E 在地震中倒塌,其倒塌状况与教学楼 C 类似,但全部 5 层均倒塌(图 5(b))。

教学楼 A、B、C 及角部教学楼 E、F 的结构剖面均如图 6 所示,教室跨度远大于走廊跨度,地震发生时正在上课,教室荷载比走廊大。因此,跨度较大的教室边柱是结构中最不利的受力构件,特别是底层边柱,因此教室边柱上下端出铰后先折断破坏,导致整个结构向教室一侧方向倾倒破坏。由图 5(a) 可见,角部教学楼 F 南北两侧分别有阶梯教室和教学楼 C 作为依靠支撑,因此地震中未立即发生倒塌。

212 阶梯教室

阶梯教室为 2 层框架结构,其中层 1 为三跨框架,层 2 为一跨框架。层 1 框架柱端出铰,填充墙破坏;层 2 主体框架无显著震害,但因受角部教学楼 F 和教学楼 A 倒塌牵连,导致北面的填充墙(后墙)严重破坏(图 7)。

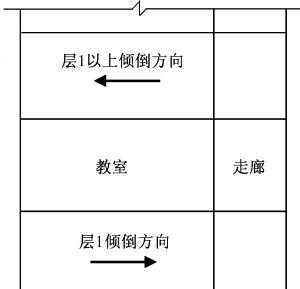


图6 教学楼结构剖面

213 中央楼梯间

中央楼梯间是连接教学楼 A 和教学楼 B 走廊的独立框架结构,学生均从中央楼梯间到教学楼 A 和教学楼 B 走廊进入各层教室。中央楼梯间南北向为 5 跨,东西向为 1 跨(图 8)。底层北侧首层楼梯破坏严重,梯板拉断,梯梁剪坏,梯板使框架柱形成短柱破坏,首层框架柱顶出现塑性铰(图 8(b))。但中央楼梯间未倒塌,一是由于地震时荷载比教学楼小(无填充墙和楼面活荷载),二是可能由于楼梯板的斜撑作用大大增强了中央楼梯间的抗侧刚度和承载力。

214 食堂

食堂为 2 层框架结构,南北向 4 跨,东西向 6 跨。因层数少,地震时无人就餐,荷载较小,故未倒塌。震害主要集中在层 1,南面的东西两侧的楼梯间破坏严重(图 9(a),(b)),层 1 餐厅框架柱顶出铰,填充墙严重破坏,地面下沉(图 9(c)),而层 2 震害很轻(图 9(d))。

215 办公楼

办公楼为 3 层框架结构、局部 4 层,由于其开间较小,总体破坏程度较轻,未倒塌(图 10(a))。主要震害是:1)西面与教学楼 A 连接处因教学楼 A 倒塌破坏而受影响(图 10(b));2)东面入口处装饰外墙坠落(图 10



图7 阶梯教室震害照片



图8 中央楼梯间震害照片



图9 食堂震害照片



图10 办公楼震害照片

(c)), 主要原因是装饰墙厚度近 500mm, 自重过大, 且与主体结构几乎无拉结; 3) 地基有下陷, 但比较均匀, 对主体结构无很大影响。

21.6 教工宿舍

教工宿舍 I 为 5 层框架结构, 层 1 坍塌(图 11(a)), 后因其他原因(爆破或余震)倒塌(图 11(b))。教工宿舍 L, M, N 为砖混结构, 其中 L, M 为新建, 分别为 4, 5 层(图 12), N 为旧建筑, 为 4 层。教工宿舍 L, M, N 均未倒塌, 但破坏比较严重(图 12(b))。

21.7 学生宿舍

学生宿舍为 5 层砖混结构, 底层下坐倒塌, 上部结构破坏较为严重但未倒塌, 多数纵向砌体墙出现剪切斜裂缝(图 13)。该结构每两个开间在砌体墙内设置一个混凝土构造柱, 设置构造柱的砌体墙破坏较轻, 未设置构造柱的砌体墙剪切破坏较为严重, 其中中间一跨的填充墙和外纵墙发生严重倒塌破坏, 由于圈梁和现浇板发挥了悬链线效应, 没有导致连续倒塌。现场观察发现, 圈梁和现浇板端部和跨中出现塑性铰, 楼板内

混凝土断裂, 钢筋发挥拉结作用。

3 震害分析

从外观上看, 除教工宿舍 N 为旧建筑外, 其他均属于新建建筑, 估计新建建筑是按 01 版抗震规范设计的, 从现场考察情况看, 总体施工质量较好, 无明显设计和施工不当, 且框架结构为全现浇(包括楼板)。漩口中学位于 5#12 汶川地震震中极震区, 实际地震烈度达 11 度, 超过当地 8 度设防 3 度, 也超过了 8 度大震水平近 2 度, 因此结构发生严重破坏和倒塌可以认为不违反规范设计目标, 况且据现场调查, 教学楼倒塌也并非在 5#12 的 8 级主震中立即倒塌, 而是在其后的余震中倒塌或爆破拆除倒塌, 死亡人数仅 10 多人。尽管如此, 我们还应该看到, 角部教学楼 F(爆破拆除倒塌)、中央楼梯间、阶梯教室、食堂、办公楼和教工宿舍 L, M, N 未倒塌, 教工宿舍 I 仅底层倒塌(余震中倒塌或爆破拆除倒塌), 学生宿舍底层倒塌、中部横隔墙和外纵墙倒塌。由于漩口中学的场地情况相同, 可排除场地地震动差异的影响。因此, 这些建筑结构的震害结果对于研究抗巨震倒塌具有重要价值。

所谓/巨震0是指地震动强度水平超过设计大震水平的地震。我国大部分地区为 6~7 度的低烈度区, 并多次在低烈度地区发生高出设防烈度 2 度以上的地震, 如 1966 年邢台地震, 设防 7 度, 实际 10 度; 1975 年



图11 教工宿舍 I 震害照片



图12 教工宿舍 L, M 震害照片



图13 学生宿舍震害照片

海城地震, 设防 6 度, 实际 9~11 度; 1976 年唐山地震, 设防 6 度, 实际 11 度, 造成很大的人员伤亡和损失。由于对地震机制和规律的认识还远远不够, 目前还很难预测巨震, 因此在建筑抗震设计中(特别是低烈度地区)考虑/巨震设防 0 是十分必要的。对于一般建筑结构, 目前我国规范规定的抗震设防目标是: 小震不坏, 中震可修, 大震不倒^[1]。为此, 建议/巨震 0 的设防目标是: 减少人员伤亡, 在结构发生十分严重破坏的情况下, 仍具有足够的生存空间, 即结构不发生如漩口中学教学楼的整体结构完全倒塌, 可称为/巨震不塌 0。由前述震害调查可知, 角部教学楼 F、中央楼梯间、阶梯教室、食堂、办公楼和教工宿舍 L、M、N 达到了/巨震不塌 0 目标, 但教学楼 A、B、C 和角部教学楼 E 未达到/巨震不塌 0 目标。除教工宿舍 N 外, 这些建筑估计为同一设计院按 01 抗震规范设计, 施工单位也估计是同一家, 且处于同一场地, 因此规范在实现/巨震不塌 0 目标方面有值得研究和改进之处。

首先看几个框架结构, 倒塌的教学楼与未倒塌的几栋框架结构相比差别在于: 1) 中央楼梯间为 5 @1 跨, 且有楼梯作为结构斜撑, 抗侧刚度大、承载力高, 地震时荷载小; 2) 阶梯教室仅 2 层, 首层 3 @5 跨, 高度远小于教学楼, 且地震时荷载小; 3) 食堂也仅 2 层, 且为 4 @6 跨, 高度远小于教学楼, 且地震时荷载小; 4) 办公楼为内走廊, 横向 3 跨, 且开间小, 填充墙多, 地震时荷载小于教学楼; 5) 教工宿舍 I, 横向可能为 3 跨, 且开间小, 填充墙多, 地震时荷载小于教学楼。

由教工宿舍 I 与教工宿舍 L、M、N 的震害相比可知, 砖混结构的震害比框架结构的轻, 其原因在于砖混结构教工宿舍墙体数量是根据建筑用途需要布置, 并非仅按满足抗震承载力需要确定, 因此实际抗震承载力与计算抗震承载力需求相比有较高富裕。而框架结构的实际抗震承载力则比计算抗震承载力需求富裕并不多, 由于构造上的原因, 填充墙承载力又不能得到发挥。至于学生宿舍的震害现象目前还无法解释, 有待进一步的调查分析。

4 增强结构抗地震倒塌能力的措施

根据文[2]的研究, 结构的抗地震倒塌能力主要与结构的冗余度、整体性、关键构件承载力储备有关。

结构冗余度是一种结构整体性指标, 主要反映其耐受意外事件的能力, 即当一个构件失效后从结构中移除, 剩余结构如不能适应由此造成的内力重分布而发生连续破坏, 则该结构的冗余度就小; 反之, 结构的冗余度就大。冗余度大的结构在巨震中不易发生倒塌破坏。对于框架结构, 如果总高度、层数、层高均相同,

则多跨框架的冗余度要大于少跨框架的冗余度; 如果高度、层数、层高、跨数都相同, 则跨度越大, 冗余度越小; 对于抗震结构, 当跨数和跨度相同, 层高越高、层数越多, 冗余度也越小。

结构的整体性包括三个方面:

(1) 结构整体协同受力, 合理分配结构中各个构件和楼层的刚度和强度, 以实现结构的整体屈服机制。对于框架结构, 就是要求实现/强柱弱梁 0 破坏机制。教学楼的倒塌模式属于柱铰层屈服机制, 其他框架结构也出现柱铰破坏震害, 因此在这方面也有需要改进之处。有关/强柱弱梁 0 问题的分析见文[3]。

(2) 构件之间的连接构造措施应能保证实现结构的整体受力。由教学楼 B 框架柱底破坏后观察到的连接构造状况可知, 该结构在整体受力方面也存在一定的问题。

(3) 足够的构件延性抗震构造措施, 保证结构实现整体屈服机制目标时的承载力和变形能力。这一要求在很多框架结构抗震设计文献和抗震规范中均有明确规定。由于漩口中学的框架结构均没有实现/强柱弱梁 0 破坏机制, 无法对这一问题进行针对性的解释。

提高结构的抗震承载力储备是增强结构抗震能力最重要也是最简单的方法。如地震时正值上课时间, 中央楼梯间和食堂的人很少, 实际荷载远远低于设计荷载, 结构承载力有较多的富裕, 因此避免了倒塌。同样, 办公楼由于小开间的需要, 有大量的填充墙。这些填充墙能够提供额外的承载力, 大大增强了抗震承载力, 因此办公楼的震害程度最轻。不过需要注意的是, 填充墙的不合理布置会导致结构刚度和强度配置不均匀, 如果这种不均匀程度太大, 以至结构整体受力存在刚度或强度的突变, 则可能对整体结构的抗震造成负面影响。

由于经济的原因, 目前无法大范围提高整个结构的抗震承载力储备, 因此可以根据不同结构构件的重要性程度, 对重要性程度高的构件增加其抗震承载力储备, 这也是结构整体协同受力的最重要内容。尽管关于这方面的研究目前还不深入, 但根据经验可知, 对于框架结构, 框架柱比框架梁的重要性高, 因此应该提高框架柱的抗震承载力储备, 这实际上是从另外一个角度说明了/强柱弱梁 0 的意义。此外, 从结构构件重要性概念分析可知, 底层框架柱的重要性高于上部楼层框架柱, 应给予更大安全储备。从未倒塌的中央楼梯间和食堂的震害情况可知, 底层框架柱出铰, 但层 2 以上框架柱未出铰, 因此底层的承载力储备存在不足, 应予以提高。教师宿舍 I 和学生宿舍底层倒塌也说明底层承载力储备需提高。

(下转第 29 页)

剪力墙,而靠近框架柱部分厚板依然由板上部(层 a, b)承力,然后就近传给柱,并且可以看出大部分板自重以及板受力传递到剪力墙上;完全由剪力墙支承部分厚板(B1, B6, B7, B12, B13, B18)传力路径为:板自重以及板受力主要由厚板下层部分(层 d, e)承力,然后就近传递到支承剪力墙上。中间层(层 c)基本不承力。从图 5 可以看出, KZ4 和 KZ6 对 KZ2 有一个拉结作用, KZ7 和 KZ9 对 KZ11 有一个拉结作用。通过传力路径的分析,可以在设计中有目的地增强或者减弱某些构件的作用。

由位移优化结果可以看出:中段框支柱支承部分厚板较柔,两头剪力墙支承部分厚板较刚,最大竖向位移发生在厚板最下层(层 e)和柱顶连接处,中段厚板顶层(层 a, e)都没有大的削减,从而保证了最大竖向位移在规定的范围内。而两头厚板的形式则对最大竖向位移影响不大,故削弱较多。

由应力准则和位移共同控制的优化结果兼顾了两者的要求,结果显示:中段部分厚板优化结果为中间层删除严重,底层几乎没有删除,顶层大部分单元保留而形成规则的几何形状,整体成一空心板;而两端部分厚板除了最底层单元有一部分保留外,其余层几乎只保留了剪力墙上部单元。与基于应力的优化结果相比,底层单元的去留显然是受位移控制的。

通过优化结果分析,对于本例受力情况,建议做如下形式改进:实际工程中厚板中段可以做成空心板,空心板加肋处即为中间各层单元保留处,空心板配筋设计以及局部加强可以参考优化结果。而厚板两头可以做成局部减薄板,对厚板上层进行减薄,保留底层,局部减薄板周边要进行加强,加强部位可以参考优化结果。

3 结语

(1)改进后的应力准则可以应用于混凝土和岩石等非各向同性材料所组成结构的拓扑优化,改进后的位移灵敏度可以更高效地应用于大型复杂结构的优化。所以,准则改进后的渐进结构优化方法应用范围广,更适用于实际的大型土木建筑工程。

(2)应用文中方法得出的均布荷载作用下转换厚板的传力路径基本符合实际。此方法可以推广到实际多工况下厚板转换层的拓扑优化,通过拓扑优化找出传力路径,从而指导转换厚板构件设计。

(3)通过对优化结果的分析,可以为实际厚板的形式改进提供指导,从而得到符合工程实际的轻质高效厚板。

(4)文中方法同时可以应用于土木工程中其他混凝土结构工程的拓扑优化。

- [1] 范文杰,徐进永,张子达.基于双向渐进优化法的装载机臂拓扑优化[J].农业机械学报,2006,30(11):2427.
- [2] 荣见华,姜节胜,颜东煌,等.多约束的桥梁结构拓扑优化[J].工程力学,2002,19(4):162165.
- [3] 刘毅,金峰.用反向渐进结构优化方法研究洞室支护优化[J].计算力学学报,2006,23(6):652662.
- [4] XIE Y M, STEVEN G P. A simple evolutionary procedure for structural optimization [J]. Computers and Structures, 1993, 49(5): 882896.
- [5] RONG J H, XIE Y M, YANG X Y. An improved method for evolutionary structural optimization against buckling [J]. Computers and Structures, 2001, 79(3): 253263.
- [6] YOUNG V, QUERIN O M, STEVEN G P, et al. 3D bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) [C] Proceedings of the Australian Conference on Structural Optimization, Sydney, 1998: 272282.
- [7] QUERIN O M, STEVEN G P, XIE Y M. Evolutionary structural optimisation using an additive algorithm [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2000, 34(3): 2912308.
- [8] 荣见华,姜节胜,颜东煌,等.基于人工材料的结构拓扑渐进优化设计[J].工程力学,2004,21(5):6471.
- [9] 傅建林,荣见华,杨振兴.一种基于 Ishai 应力准则的双方向结构拓扑优化方法[J].长沙交通学院学报,2005,21(1):21227.
- [10] 李晶,鹿晓阳,赵晓伟.统一强度双向渐进结构拓扑优化方法[J].山东建筑大学学报,2008,23(1):6269.
- [11] 张晋芳,赵人达,向天宇.基于修正巴兰金理论的结构拓扑优化方法[J].西南交通大学学报,2008,43(5):652659.
- [12] 荣见华,郑健龙,徐飞鸿.结构动力修改及优化设计[M].北京:人民交通出版社,2002.

(上接第 57 页)

5 结语

通过漩口中学的倒塌和未倒塌建筑结构的对比,对影响框架结构抗倒塌能力的因素进行了分析,指出了结构的冗余度、整体性和关键构件的安全储备对增强结构抗巨震倒塌能力的作用。目前,我国抗震规范还没有反映结构冗余度的影响,对于抗倒塌要求的结构整体性规定也不明确。在保证结构冗余度和整体性的前提下,提高关键构件的承载力储备可有效改善和提高结构的抗倒塌能力,但目前关于如何确定结构的关键构件,以及如何确定不同重要性程度关键构件的承载力储备,通常有经验的设计人员会根据具体工程情况适当掌握,但在定量方面还有待研究。

- [1] GB50011) 2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] 叶列平,曲哲,陆新征,等.提高建筑结构的抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J].建筑结构学报,2008,29(4):42250.
- [3] 叶列平,曲哲,马千里.从汶川地震框架结构震害谈/强柱弱梁屈服机制的实现[J].建筑结构,2008,38(11):52259.