

# 104所农村中小学砌体结构校舍抗震设计思路及震害分析\*

毕琼, 冯远, 易丹

(中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610081)

[摘要] 对位于地震区农村中小学砌体结构校舍的抗震设计理念进行了阐述。对该类结构在5·12汶川地震中的震害进行了分析和总结, 最后对该类结构, 特别是大开间少墙教学楼结构的设计提出了几点建议。

[关键词] 砌体结构; 教学楼结构; 独立窗间墙; 扶壁柱; 圈梁

## Seismic hazards analysis and design concepts of masonry-concrete structures for 104 rural school buildings

Bi Qiong, Feng Yuan, Yi Dan

(China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610081, China)

**Abstract:** Through the analysis and summarization of seismic hazards of 104 rural school buildings in 5·12 Wenchuan earthquake, some design concepts were presented for masonry concrete structures used in rural schools located at the seismic regions. The conclusions can be applied in the design of masonry concrete structures, specially for the long bay spacing and less-wall school buildings.

**Keywords:** masonry concrete structure; school building structure; wall between windows; buttress column; ring beam

### 0 前言

“成都市农村中小学标准化建设工程”共设计校舍104所, 我院于2006年完成了全部设计工作, 所有校舍在汶川地震之前已投入使用。其中65所校舍位于汶川地震的极重灾区, 这些建筑遭遇的地震烈度变化较大, 发生了不同程度的震损; 尤其是位于断裂带附近的建筑, 所遭遇的地震烈度值远高于其抗震设防烈度, 部分教学楼发生了较为严重的震损, 但无一例倒塌, 均表现出了良好的抗震性能, 且部分校舍在地震过后, 经过加固维修又继续投入使用。

校舍多为3~4层单面走廊砌体结构, 楼、屋盖采用预制预应力空心楼板, 抗震设防烈度均为7度(0.1g)。对于装配式单面走廊砌体结构, 如何保证结构整体的抗震性能、提高其延性、达到规范要求的抗震设防目标, 是该类工程设计的重点和难点。我院对该类工程设计采取了一系列行之有效的抗震加强措施, 并经受住了汶川地震的考验, 其出色表现是对唐山地震后规范修订、增补内容的一次实际验证, 同时对以后规范的修编、完善具有一定的借鉴作用。

### 1 抗震设计思路

#### 1.1 结构平面布置规整化

通过防震缝将教学楼分隔成多个较为规则的结构单元, 避免出现转角及平面突出, 比现行规范更为严格

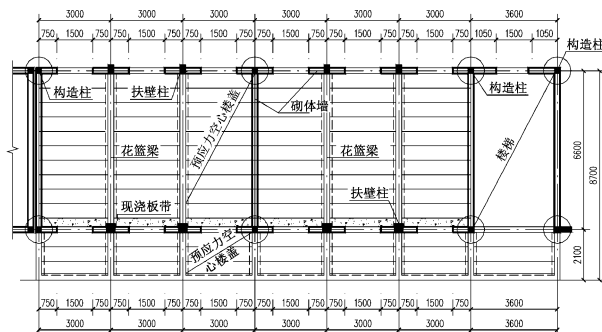


图1 典型教学楼标准层平面图/mm

地控制结构单元长度, 以避免和减轻结构在地震作用下的扭转破坏。

#### 1.2 构造柱、扶壁柱设置

在砌体结构中, 构造柱与圈梁共同工作形成弱框架体系, 能够有效约束砌体墙, 提高其承载力及位移延性, 增强在大震作用下结构的防倒塌能力。故构造柱及圈梁的设置对提高砌体结构的抗震性能具有重要作用, 《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)<sup>[1]</sup> (简称抗震规范) 对砌体结构中构造柱的设置有一定的要求。图1所示为教学楼典型平面图, 图中圆圈位置为按抗

\* 国家科技支撑计划(2009BAJ28B01)。

作者简介: 毕琼, 学士, 教授级高级工程师, Email: bijiong0312@163.com。

震规范要求必须设置的构造柱,其尺寸为 240mm × 240mm。

同时,在静力荷载作用下,教学楼楼面荷载的传力途径为: 预制预应力空心楼板 → 钢筋混凝土花篮梁 → 纵向独立窗间墙 → 地基基础。在地震作用下,纵向独立窗间墙不仅承受花篮梁传来的楼屋面竖向荷载,还处于平面内、外弯矩及剪力的复杂受力状态之下,是结构的薄弱部位。窗间墙为主要竖向承重构件,一旦遭遇破坏坍塌,会引起结构的整体坍塌。所以保证花篮梁下的独立墙体的抗震承载力及位移延性是至关重要的。故除按规范要求设置构造柱外,经多方案对比,综合考虑墙体平面外截面抵抗矩、抗剪承载力等因素,选择了结合建筑立面造型沿纵向在每个独立窗间墙中部设置钢筋混凝土扶壁柱的方案,并加大扶壁柱截面尺寸及配筋。

### 1.3 结合预制空心楼、屋盖布置的圈梁设计

相对于其他结构形式,预制预应力空心楼盖体系施工简单,适用于中小型施工企业施工。该类工程多数位于偏远的农村及山区,交通不便,施工条件也较为落后,客观上要求楼、屋面采用标准化程度较高的预制预应力空心楼、屋盖体系。而装配式楼盖平面内刚度较小、整体性较差,且在地震烈度较大时,预制楼板有可能塌落致使结构发生破坏。故以下两点为该类工程楼、屋盖设计重点: 1) 保证预制预应力空心楼盖体系的平面内刚度,使其能够有效传递地震剪力; 2) 保证预制预应力空心楼盖与主体结构的可靠连接,使其在大震作用下不致塌落。

为有效约束预制预应力空心楼板,在每楼层每道纵墙及横墙上均设置了钢筋混凝土圈梁,增强对预制预应力楼板的约束,如图 2 所示。

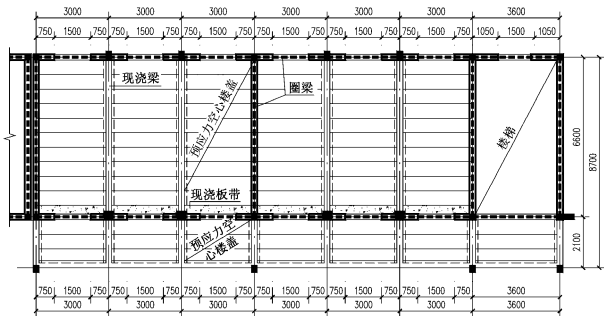


图 2 典型教学楼标准层圈梁布置图/mm

结合建筑坡形挑檐(图 3),在屋面沿纵墙增设与圈梁整浇的钢筋混凝土现浇带,形成了 T 形圈梁(图 4),对预应力空心楼板形成了较普通圈梁更强的约束作用,增强了预制预应力空心楼盖的整体刚度。

此外,为了增强预应力空心楼板的整体性,采取了在板缝之间增设钢筋混凝土现浇板带,在预制板支座

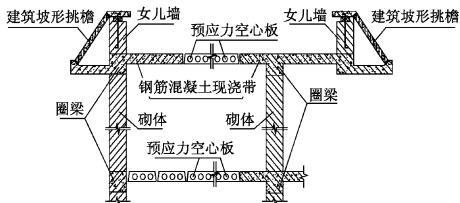


图 3 教学楼屋面结构剖面图

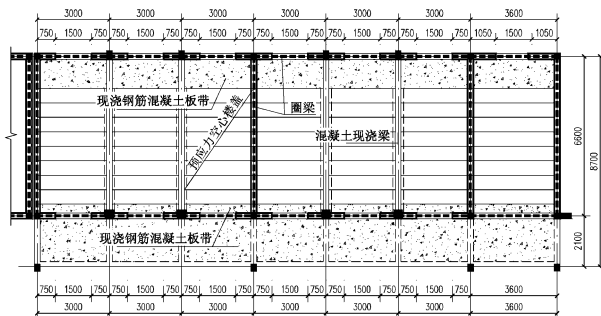


图 4 教学楼屋面层圈梁及现浇板带布置图/mm

处加强预应力空心楼板与钢筋混凝土圈梁拉结等构造措施。

### 1.4 楼梯间墙体抗震设计

当楼梯位于建筑转角处或端部时,楼梯间墙体缺少各层楼板的侧向支撑,特别是楼梯间顶层,墙体有一层半楼层高度,震害加重,故抗震规范要求:楼梯间不宜设置在房屋的尽端及转角处。相对于纵横墙较多的砌体结构,楼梯间抗侧刚度相对较弱,为结构的薄弱部位,在水平地震作用下,位于结构端部的楼梯间易首先破坏。而对于横墙较少的教学楼砌体结构体系而言,楼梯间抗侧刚度却相对较大,只要采取恰当的构造措施保证墙体的承载能力及稳定性,将楼梯间布置于结构端部是可行的。

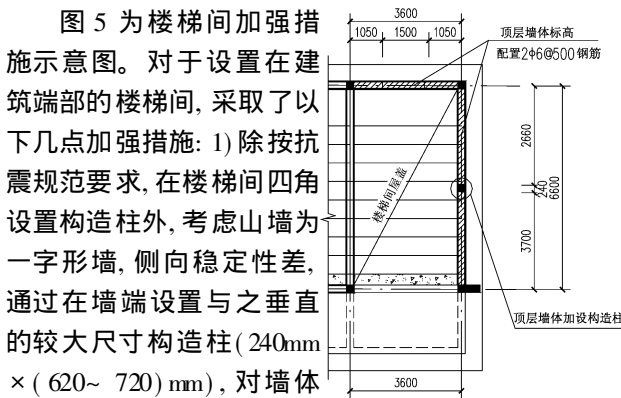


图 5 楼梯间加强措施示意图

图 5 为楼梯间加强措施示意图。对于设置在建筑端部的楼梯间,采取了以下几点加强措施: 1) 除按抗震规范要求,在楼梯间四角设置构造柱外,考虑山墙为一字形墙,侧向稳定性差,通过在墙端设置与之垂直的较大尺寸构造柱(240mm × (620~ 720)mm),对墙体提供了较强的侧向约束; 2) 鉴于楼梯间顶层墙体为一层半楼层高度,稳定性较差,通过在顶层墙内加设水平钢筋及在中部设置构造柱的措施来提高其承载力及变形能力。

## 1.5 加强结构整体性的措施

教学楼结构中,横墙间距较大,结构空间整体性较差,为加强结构空间整体作用,采取了如下措施:1)所有校舍均设置地圈梁;2)为加强基础墙体的整体性,所有构造柱均锚入混凝土条形基础。在汶川地震中的表现也说明了地圈梁在抵抗地基不均匀沉降、加强结构整体性方面有很大的贡献。

## 2 震害分析

### 2.1 独立窗间墙震害分析

纵墙主要震害特征为:独立窗间墙发生X形受剪裂缝和水平受弯裂缝(图6、7);窗台墙发生X形受剪裂缝(图8)。

所有教学楼均表现出层1破坏严重,层2及以上震损程度迅速降低的现象。在水平地震作用下,结构破坏出现在窗台墙还是窗间墙上,主要取决于窗台墙跨高比与窗间墙高宽比的相对比例,及两部分墙体抗剪能力的相对比例。在地震作用下,由窗台墙损伤达到结构的耗能,可以保全竖向承重构件(即独立窗间墙)的安全,从而实现整体结构大震不倒的目标。因此,对于砌体结构,应实现“强竖向(独立窗间墙)、弱水平(窗台墙)”延性屈服机制。由地震剪力引起的剪切破坏出现在窗台墙是所期望的破坏机制,由于对扶壁柱采取了有针对性的加强措施,大部分教学楼实现了这一延性屈服机制(图8)。

龙门山镇中心学校教学楼遭受地震烈度值达10~11度,且墙体实际砂浆强度偏低,导致纵向独立窗间墙体开裂严重(图6)。

由于在纵向独立窗间墙中部设置了钢筋混凝土扶壁柱,有效地限制和延缓了剪切斜裂缝的贯通;当窗台墙出现严重剪切破坏时,构造柱混凝土骨料之间的咬合力与构造柱中纵筋的销栓作用给窗间墙提供了至关重要的侧向支撑,从而避免了砌体沿贯通裂缝形成脱离体而垮塌,从而保证了窗间墙“大震不倒”。若窗间墙中部设置砖扶壁柱,在剪切裂缝贯通后,在地震剪力作用下,窗间墙在裂缝上下发生错动而形成脱离体,极



图6 独立窗间墙X形裂缝  
(彭州市龙门山镇中心学校)



图7 独立窗间墙水平裂缝及X形裂缝(临近建筑)



图8 窗台墙X形受剪裂缝(彭州市通济中学)

易引起窗间墙倒塌,进而引起整个结构坍塌,其破坏形态见图7。

### 2.2 建筑横墙震害分析

横墙主要震害特征为:一般发生X形交叉斜向裂缝;且底层教学楼横墙震损较为严重,层2的破坏程度远较层1的轻微,层3及以上楼层震损情况不明显。在大开间少墙教学楼砌体结构中,由于横墙间距较大,数量较少,其承担的水平地震作用较大,加之横墙进深大、无支长度长、层高较一般住宅高的特点,在地震作用下易发生震损,如图9所示;又由于教学楼中横墙还承受楼板传递的竖向荷载,若其在地震作用下由于剪切破坏而丧失竖向承载力,将引起结构的整体坍塌。在底层及层2横墙中部沿竖向以及水平向分别设置钢筋混凝土构造柱和钢筋混凝土腰带,在横墙裂缝中配置水平钢筋等加强措施对提高结构抗震性能具有重要的意义。



图9 教学楼横墙裂缝  
(彭州市通济中学)



图10 楼面预制预应力板无裂缝

### 2.3 预制预应力空心楼盖震害分析

图10为汶川地震中,高烈度区彭州市白鹿九年制学校预制预应力空心楼盖震后图片。在楼板及花篮梁处未见明显裂缝,可见在1.3节中对预制预应力楼板的加强措施是合理有效的。从而也证明了,只要结构布置合理、构造措施得当以及施工质量得以保证,采用预应力空心楼板仍然可以具备较好的整体性及抗倒塌能力。

### 2.4 楼梯间震害分析

图11为位于结构端部的楼梯间震后图片。从图中可以看出,采取1.4节加强措施的楼梯间置于结构端部时,其震损情况普遍较轻,楼梯间未见主要斜裂缝,其结构保存较为完好。图12为空旷教室位于结构

端部时震损图片,从图中可以看出,端部山墙发生剪切破坏,位于结构角部的构造柱剪切破坏。可见,只要加强措施正确有效,将刚度相对较大的楼梯间置于结构端部有利于减轻结构的扭转效应,从而避免端部山墙的扭转破坏。



图 11 位于结构端部的  
楼梯间震后图片  
(彭州市小鱼洞九年制学校)

图 12 位于结构端部  
构造柱剪切破坏  
(都江堰青城中学)

## 2.5 地基基础震害分析

在该类工程中,所有校舍均按照 1.5 节采取措施加强结构整体刚度,汶川地震中相关震害现象也说明了这些措施的正确性与有效性。彭州市白鹿中学教学楼距地震断裂带最近处不足 5m,整个教学楼建筑场地不仅发生局部上升,在垂直于断裂带方向还发生了水平错动。除了不均匀沉降变形引起变形缝有所扩大外,3 层砌体结构教学楼基本完好,如图 13 所示,只有局部存在细微裂缝,这与结构整体刚度较好是密不可分的。在都江堰青城山及其附近的校舍中,大部分建筑场地发生了大面积的砂土液化现象,如图 14 所示,但是教学楼结构均未见与地基不均匀沉降相关的震害现象。



图 13 教学楼地基变形  
(彭州市白鹿中学)

图 14 地基砂土液化  
(都江堰中兴镇九年制学校)

## 2.6 薄弱部位墙体震害分析

在配电箱等墙体开洞的薄弱部位,在水平地震作用下,容易产生角部应力集中现象。在地震中,洞口角部多产生斜向  $45^\circ$  斜裂缝,如图 15 所示。在上述部位采取适当加强措施是必要的,如在洞口上下砖缝中配置水平钢筋,在洞口四周设置边框等;此外,配电箱等洞口应尽量避免设置于纵向独立窗间墙等薄弱部位墙

体之中。

## 3 结论

通过对 104 所农村校舍设计理念的阐述,以及对这些校舍在汶川地震中震损情况的分析,对于学校建筑设计,如何提高其抗震性能,总结如下:



图 15 配电箱附近墙体震害  
(彭州市梓桐小学)

(1) 在教学楼结构中,由于纵、横墙数量较少,结构抗震性能较差,应提高对墙体的约束能力,应较普通砌体结构更加严格地设置构造柱与圈梁。

(2) 独立窗间墙为教学楼结构的薄弱环节,通过在窗间墙中部大梁下设置钢筋混凝土扶壁柱的方式,可有效增大窗间墙的抗剪、抗弯承载力及稳定性,有利于“强竖向(窗间墙)、弱水平(窗台墙)”的延性屈服机制的实现。

(3) 教学楼中横墙长度较大,宜通过在底层及层 2 横墙中部设置钢筋混凝土构造柱及水平钢筋混凝土腰带、在砖缝中配置水平钢筋等措施,提高其抗震承载力及位移延性。

(4) 通过在预制预应力空心楼盖边缘设置钢筋混凝土现浇带、增强空心楼板之间拉结等措施,在结构布置合理、构造措施得当以及施工质量得以保证的前提下,砌体结构中采用预制预应力空心楼盖仍然可以具备较好的抗震性能及抗倒塌能力。

(5) 在教学楼结构中,将抗侧刚度相对较大的楼梯间设置于结构端部是可行的,此时楼梯间应采取一定的加强措施,保证其墙体的抗剪承载力及位移延性。

(6) 在学校建筑中,特别是对于教学楼结构,通过增设地圈梁以及加强构造柱的锚固等措施加强结构空间整体性,有利于抵抗地基不均匀沉降等引起的结构破坏。

(7) 在配电箱等墙体开洞薄弱部位,宜在洞口上下砖缝中配置水平钢筋或在洞口周边设置边框等构造措施予以加强。

致谢:杨健兵、陈志强、杨媛、陆岷、魏锦涛、时诚、盛叶心、喻国成、古建辉、彭月、成锐、李鹏飞、于岷红、陈德良、陈红艳及廖荣权等同志参与了本工程的设计,在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- [1] GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.