

# 位于强震区的农村中小学教学楼 砌体结构抗震设计分析

冯远, 易丹, 毕琼

(中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610081)

[摘要] 针对大开间少墙砌体结构的受力特点, 结合教学楼震害, 分析了构造柱、圈梁对砌体结构抗震性能的影响, 并对提高结构延性的设计理念进行了阐述; 同时对大开间少墙单面走廊砌体结构的设计提出了几点建议。

[关键词] 大开间少墙单面走廊砌体结构; 构造柱; 圈梁; 延性; 窗间墙

[中图分类号] P315.9 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)06-0138-08

## 1 前言

中国建筑西南设计研究院于 2004—2006 年完成了 104 所四川农村中小学校舍的设计工作, 其中 65 所位于地震极重灾区, 这些建筑在“5·12”汶川地震中经受了检验。

“5·12”汶川地震形成 3 个主要断裂带: 汶川—茂汶后山断裂带、映秀—北川—青川中央断裂带及灌县—安县—江油前山断裂带。中国建筑西南设计研究院设计的农村中小学教学楼大多为 3~4 层, 主要采用砌体—预应力空心楼板结构, 抗震设防烈度均为 7 度(0.1 g)。其中 65 所校舍多数分布在这三条断裂带附近(见图 1)。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。尤其位于断裂带上的建筑, 所遭遇的地震烈度值远高于其设防烈度, 部分教学楼也发生了较为严重的破坏, 但无一例倒塌, 均表现出良好的抗震性能。这些教学楼建筑均为大开间少墙单面走廊砌体结构, 其结构抗震性能具有较高的研究价值。

图 2 为中国建筑西南设计研究院设计的四川农村中小学工程中具有代表性的几所学校的震后图片。其中龙门山镇九年制学校位于映秀—北川—青川中

央断裂带上; 小鱼洞九年制学校、紫坪铺学校位于中央断裂带与灌县—安县—江油前山断裂带之间; 白鹿镇九年制学校、通济镇中学及向峨小学均位于前山断裂带上。在“5·12”地震中, 这些学校经受了高烈度地震作用的检验, 其良好的抗震性能得以验证。

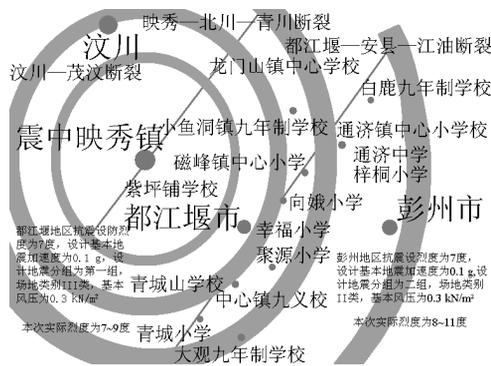


图 1 学校位置分布示意图

Fig. 1 Locations of the schools

## 2 典型教学楼震害分析

笔者列举了 65 所学校中具有典型震害的教学楼进行震害分析。

### 2.1 典型教学楼震害介绍

1) 彭州市通济中学位于灌县—安县—江油前

[收稿日期] 2009-04-15; 修回日期 2009-04-23

[作者简介] 冯远(1961-), 女, 江苏南京市人, 中国建筑西南设计研究院有限公司总工程师, 研究方向为建筑设计; E-mail: xnyfy@vip.163.com

山断裂带上。主体结构为3~4层,遭遇地震烈度为8~9度(依据国家地震局公布的汶川8.0级地震烈度分布图),主要震害如图3所示。

2)彭州市白鹿中学位于灌县—安县—江油前山断裂带上。据当地教师介绍,地震发生时,在原本平坦场地上的三层教学楼随地而上升约3 m,在之

后的几日内回落至2 m左右。断裂带距教学楼最近处不足5 m,整个场地不仅发生局部上升,在垂直于断裂带方向还发生了错动,而且整个场地还发生了水平位移。断裂带上的南端学生宿舍严重倾斜,北端教师宿舍被夷为废墟,三层砌体结构教学楼基本完好,只有局部细微裂缝,主要震害如图4所示。



图2 四川省部分学校教学楼  
Fig. 2 Some teaching building of Sichuan



图3 彭州市通济中学震害照片

Fig. 3 The pictures of seismic damage of Tongji Middle School of Pengzhou city

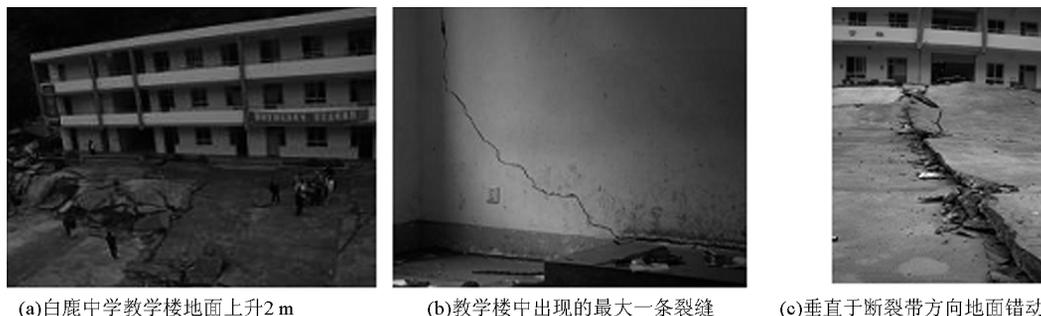


图4 彭州市白鹿中学震害照片

Fig. 4 The pictures of seismic damage of Bailu Middle School of Pengzhou city

3) 彭州市龙门山镇中心学校, 位于映秀—北川—青川中央断裂带上, 为四层砌体结构, 遭遇地震震烈度为 9~10 度(依据国家地震局公布的汶川 8.0 级地震烈度分布图)。地震发生时, 首先是较长时间的强烈竖向振动, 随后是剧烈水平振动。由于龙门山镇中心学校遭遇的地震烈度值高, 故其震害在 65 所农村中小学中最为严重。该建筑平面呈八字

形, 设置在中部的抗震缝将左右两部分划分为独立的结构单元, 震损情况也表现不同, 如图 5 所示。

图 6 为农村中小学典型教学楼平面图。(龙门山镇中心学校左肢建筑平面尺寸为开间 3 m × 3.6 m, 进深 7.8 m, 窗间墙长 1.8 m, 其余均同典型平面)。

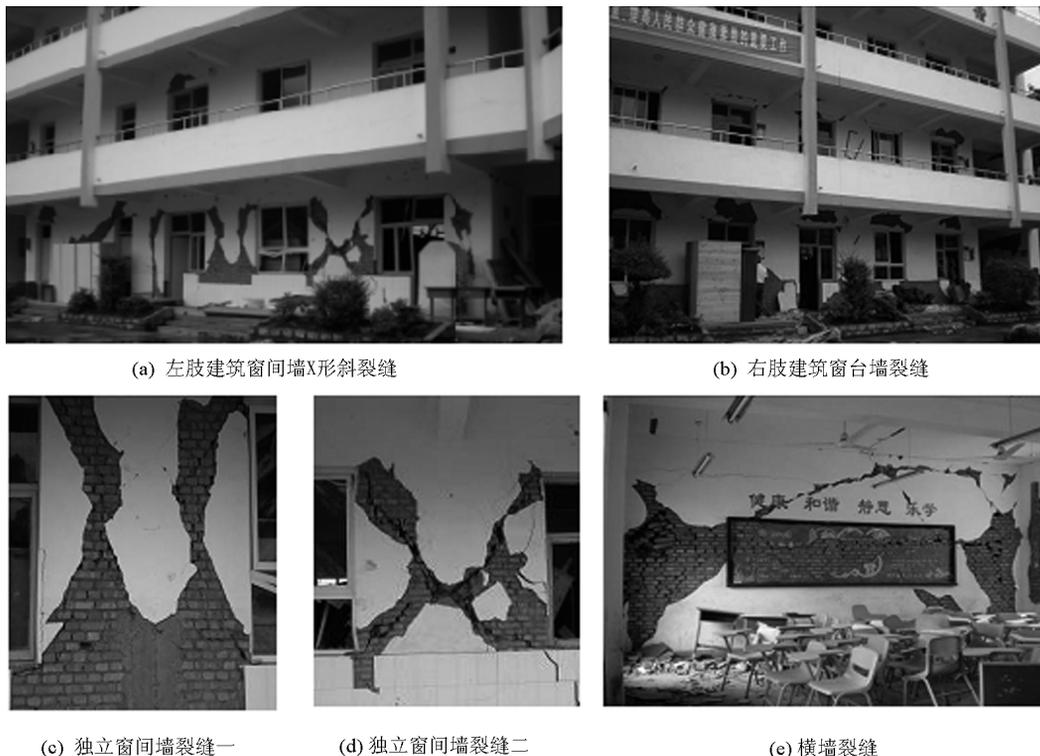


图 5 彭州市龙门山镇中学震害照片

Fig. 5 The pictures of seismic damage of Longmenshan Middle School of Pengzhou city

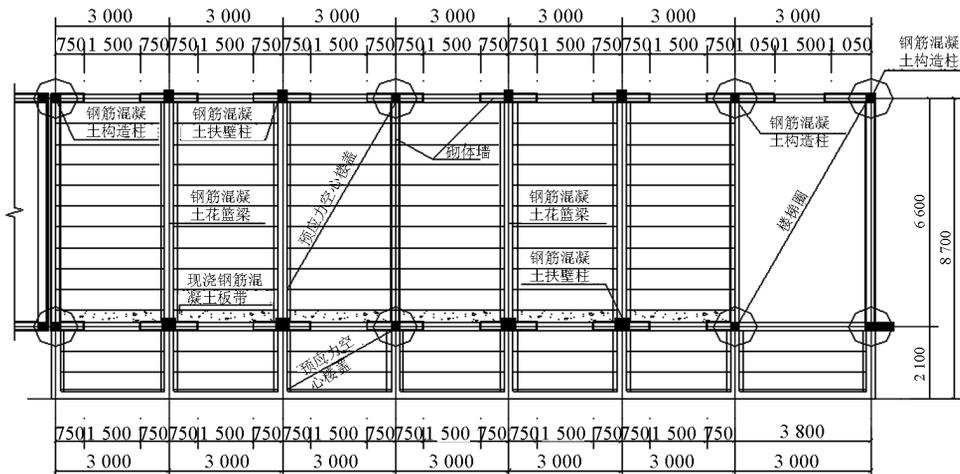


图 6 典型教学楼标准层平面图(单位:mm)

Fig. 6 Layout of a typical teaching building (Unit: mm)

## 2.2 纵墙震害分析

纵墙主要震害特征为:发生 X 形受剪裂缝和水平受弯裂缝。有的裂缝分别出现在窗间墙(见图 5(a))或窗台墙上(见图 3(a)),也有同时出现在两个部位的。所有教学楼均表现出一层破坏严重,二层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,主要取决于因素是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。两部分墙体中较弱者首先出现裂缝并发生破坏。

当结构遭遇地震作用时,耗能由部分结构构件的损伤完成。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(窗间墙)、弱水平(窗台墙)”延性屈服机制。由中国建筑西南设计研究院设计的农村中小学工程中,大部分教学楼实现了这一延性屈服机制。

龙门山镇中心小学教学楼由于遭受地震烈度值太高,导致纵向独立窗间墙体开裂严重(见图 5(a), 5(c), 5(d)),由于设计在纵向独立窗间墙中部设置了钢筋混凝土扶壁柱,限制了砌体 X 形剪切裂缝的贯通,从而避免了砌体沿贯通裂缝形成脱离体而垮塌。由震害可以看出,窗间墙中部设置钢筋混凝土扶壁柱能够提高砖砌体的抗剪承载力及结构延性。为了保证窗间墙在大震下的竖向承载力及整体结构大震不倒,可采取提高窗间墙砌体承载力的措施,使窗台墙先于窗间墙破坏,诸如在窗间墙中部设置钢筋混凝土构造柱,加大窗间墙宽度以及在窗间墙上设置配筋砖砌体等。

## 2.3 横墙震害分析

大开间少墙砌体教学楼结构的横墙在抗震方面存在如下弱点:进深大、横墙无支长度长、层高较一般住宅高;加之横墙数量少,间距较大,其承担的水平地震作用较大,所以在地震作用下极易发生震损。在“5·12”汶川地震中,高烈度地区教学楼的横墙破坏较为严重,一般发生 X 形交叉裂缝,如图 3(c)及图 5(c)所示。各楼层的震损情况同纵墙一样,二层的破坏程度远较一层轻微。为了保证作为教学楼中重要承重构件的横墙在大震下具有一定的竖向承载力及抗震延性,建议在横墙中部沿竖向及水平分别设置钢筋混凝土构造柱及钢筋混凝土腰带。

## 2.4 楼梯间震害分析

图 7 为龙门山镇教学楼端部楼梯间墙体受损情况,与图 5 中纵墙和横墙震害比较,楼梯间震损程度相对较轻。



图 7 龙门山镇教学端部楼楼梯间墙裂缝图  
Fig. 7 Cracks in the stair room walls at the end of Longmenshan Middle School

## 3 设计特点

### 3.1 构造柱设置

典型教学楼采用砌体结构,预应力空心楼盖,建筑层高 3.6 m,教室进深 6.6 m,开间 9 m。纵向开窗尺寸宽和高为 1 500 mm × 1 800 mm,独立窗间墙长度为 1 500 mm。预应力板沿纵墙方向布置,在每隔 3 m 平行横墙方向设置截面尺寸为 240 mm × 500 mm 的钢筋混凝土花篮梁支撑预应力空心板,以将楼盖荷载传至纵墙。图 6 中圆圈位置所示为按《建筑抗震设计规范》(2001 年版)<sup>[1]</sup>要求必须设置的构造柱,其尺寸为 240 mm × 240 mm。

教学楼结构中纵向独立窗间墙,在地震作用下,不仅承受花篮梁传来的楼屋面竖向荷载,还处于平面内、外弯距及平面内、外剪力的复杂受力状态之下,是大开间少墙砌体结构的薄弱部位。窗间墙为主要竖向承重构件,一旦遭遇破坏垮塌,会引起结构的整体坍塌。所以花篮梁下的独立墙体的构造设计是非常重要的。为此,设计时对花篮梁作用处的纵向独立窗间墙体采取了加强措施,并进行了多方案比较(见图 8)。

#### 3.1.1 方案一 在独立窗间墙花篮梁下设置砖砌体扶壁柱

此种方案为在花篮梁下设置砖砌体扶壁柱,扶壁柱大小由受压及受剪承载力确定(见图 8(a))。该方案优点为构造简单,施工方便,造价较低。但存

在不足之处:a. 虽然带砖柱翼墙具有一定抗剪承载力,但是当达到临界剪力,进入塑性变形阶段时,砌体破坏呈现明显的脆性特征。当结构遭遇大于设防烈度地震作用时,带砖柱翼墙会因缺乏延性突然破坏,引起结构整体倒塌;b. 由于砌体结构抗弯能力极差,窗间墙在受到由地震作用产生的平面外弯矩

时,会在带砖柱翼墙上过早产生水平裂缝,在水平剪力作用下,剪切斜裂缝迅速贯通,窗间墙墙体错位,极易引起结构倒塌(见图9);c. 在大地震发生时,由于竖向地震作用分量很大,砖砌体抗拉强度极低,也会导致严重破坏(见图10);d. 砖砌体扶壁柱尺寸较大,影响建筑使用功能或建筑外立面。

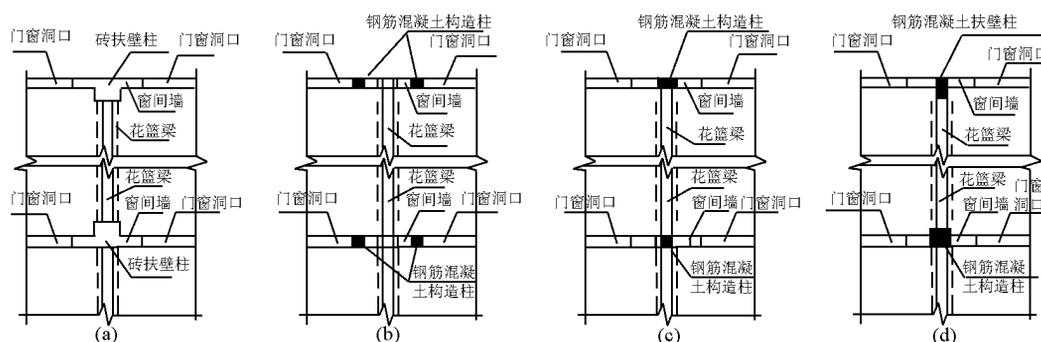


图8 纵向独立窗间墙构造柱设置方案

Fig.8 Schemes of the arrangement of constructional columns in walls between windows along longitudinal direction



图9 由平面外弯矩及面内剪力引起的窗间墙水平裂缝及X形裂缝(非本院设计)

Fig.9 The horizontal and X-shaped cracks caused by the out-of-plane moments and in-plane shears (not designed by our institute)



图10 由竖向地震作用导致顶层窗间墙发生水平裂缝(非本院设计)

Fig.10 The horizontal cracks on the top caused by the vertical earthquake (not designed by our institute)

3.1.2 方案二 独立窗间墙两端部设置钢筋混凝土构造柱,花篮梁下设置钢筋混凝土梁垫

该方案在窗间墙两端部设置构造柱(见图8(b)),并在花篮梁作用位置设置刚性梁垫。其优点为:a. 窗间墙砌体由于设置了构造柱和刚性梁垫,砌体抗压及抗剪承载力有所提高;b. 构造柱及圈梁形成的弱框架体系,使砌体结构的延性得到改善。不足之处有:a. 纵向独立窗间墙的平面外抗弯刚度没有得到明显提高;b. 施工支模量较大,给施工带来不便。

3.1.3 方案三 在独立窗间墙花篮梁下设置钢筋混凝土构造柱(柱高同墙厚)

在花篮梁下独立窗间墙中部设置同墙厚的钢筋混凝土构造柱(见图8(c))。该方案优点为:a. 与方案二中构造柱设置在墙两端部比较,在墙段中部剪应力峰值处设置钢筋混凝土构造柱,能够较大幅度地提高组合砌体的抗剪承载力;b. 构造柱与圈梁连接,可起着在遭遇地震时防止墙体开裂后散落垮塌的作用,形成的弱框架结构体系,对具有脆性性质的砌体增加延性,提高结构的防倒塌能力。但同时,它也存在不足:纵向独立窗间墙平面外抗弯刚度没有得到明显提高。

3.1.4 方案四 在独立窗间墙花篮梁下设置钢筋混

凝土扶壁柱(柱高大于墙厚)

在纵向独立窗间墙花篮梁作用位置,设置截面高度大于墙厚的钢筋混凝土扶壁柱(见图8(d))。该方案除具有与方案三相同的优点外,另具有明显优点:通常设计独立窗间墙砌体时,只考虑承担平面内地震弯矩,未考虑平面外弯矩的作用。但汶川地震显示,在水平地震作用下,花篮梁下的窗间墙会承受较大的平面外弯矩作用而导致破坏(见图9)。通过在窗间墙中部设置钢筋混凝土扶壁柱,可明显提高墙体平面外抗弯强度及稳定性,对结构抵抗大震能力的提高起到重要作用。同时,该方案也是结合建筑立面造型,将其外凸竖线条做成结构受力扶壁柱,实现了建筑和结构的完美结合。

表1为按方案二、三、四设置钢筋混凝土构造柱的窗间墙的地震抗剪承载力计算值及截面抵抗矩对比,从中可以看出方案三、四的地震作用抗剪承载力可比方案二提高约55%;方案四的墙体截面抵抗矩可比方案二、三提高40%(即按方案四在独立窗间墙中部设置钢筋混凝土扶壁柱,在相同的面外弯矩作用下,弯曲正应力可减小约30%)。由此可见,在纵向独立窗间墙设置钢筋混凝土扶壁柱,可大幅提高墙体平面内抗剪承载力、平面外抗弯承载力和稳定性。纵向独立窗间墙中部设置钢筋混凝土扶壁柱,是本项目针对大开间少墙砌体结构所采取的主要抗震措施之一。另外,本项目在每段墙肢设置构造柱的方案也被汶川地震证明是非常必要的。可对照另一幢间隔墙段设置构造柱的砌体结构在地震作用下的破坏现象(见图11),无构造柱的墙段破坏程度远较有构造柱的墙段严重,部分墙体已垮塌,说明每段墙肢设置钢筋混凝土构造柱是非常必要的。

表1 窗间墙地震作用抗剪承载力及面外截面抵抗矩对比

Table 1 The comparisons of the shear strength against earthquake and out of plane inertial moment of the walls between windows

	方案二	方案三	方案四
地震作用抗剪承载力/kN	94.5	147.9	155.3
构造柱截面尺寸/mm <sup>2</sup>	240 × 185(2个)	370 × 240	240 × 370
截面抵抗矩	1	1	1.4

注:1)砌体强度为M10,砂浆强度为M10,构造柱强度等级为C25;2)墙体截面平均压应力与抗剪承载力设计值之比为4.0;3)构造柱纵筋为6φ14+2φ12,独立窗间宽度为1500mm;4)3个方案的构造柱截面面积相等;5)假定方案二、三的截面抵抗矩为单位。



图11 间隔设置构造柱的砌体结构震害(非本院设计)

Fig. 11 The earthquake hazards of masonry building, the constructional columns were set every other room (not designed by our institute)

### 3.2 圈梁设置

本项目在砌体结构的每楼层每道纵墙及横墙上均设置了钢筋混凝土圈梁,与现浇花篮梁及钢筋混凝土构造柱和扶壁柱一起构成具有延性性能的弱框架体系,可大幅度地提高砌体结构的整体变形能力,增强结构在大震作用下的延性,以实现大震不倒的设防目标(见图12)。

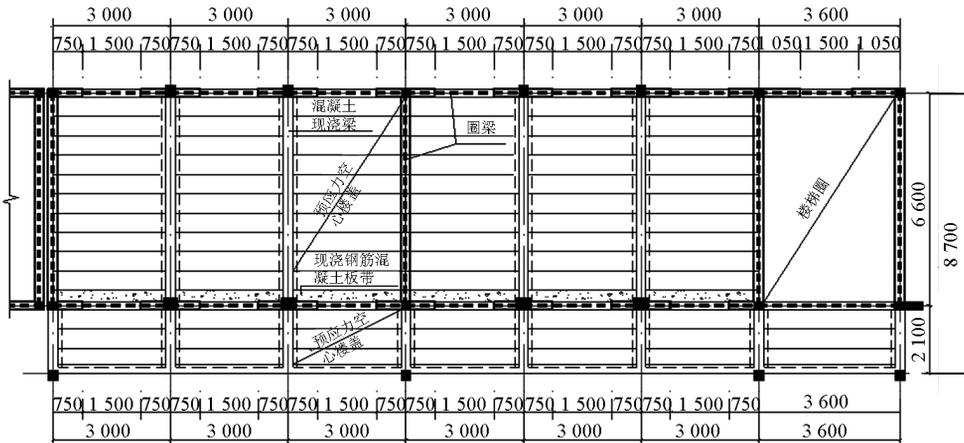


图12 典型教学楼标准层圈梁布置图(单位:mm)

Fig. 12 Layout of the ring beams of a typical teaching building (Unit: mm)

### 3.3 楼屋盖体系确定

建筑楼盖按结构形式分为现浇整体式、装配式和装配整体式三种。其中现浇整体式楼盖整体性好,平面内刚度大,能够有效地传递地震剪力;而装配式楼盖平面内刚度较小,整体性较差。但由于装配式楼盖体系中的预应力空心板具有生产制作标准化程度高,可缩短施工周期及降低工程造价等优点,仍被一些工程所采用。

该工程建筑造型,在屋面采用坡形挑檐(见图13)。结构设计结合建筑坡形挑檐,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(见图14),对预应力空心楼板形成了环箍作用,增强了预应力空心楼盖的整体刚度。65所

学校在汶川地震中的震害表明,楼屋盖只要结构布置合理、构造措施得当以及施工质量得以保证,教学楼中采用预应力空心楼板仍然可以满足设防目标。

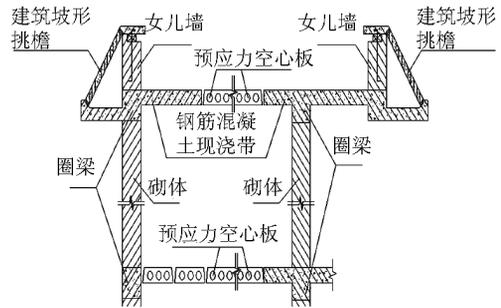


图13 教学楼屋面结构剖面图

Fig. 13 Cross sections of the building's roof

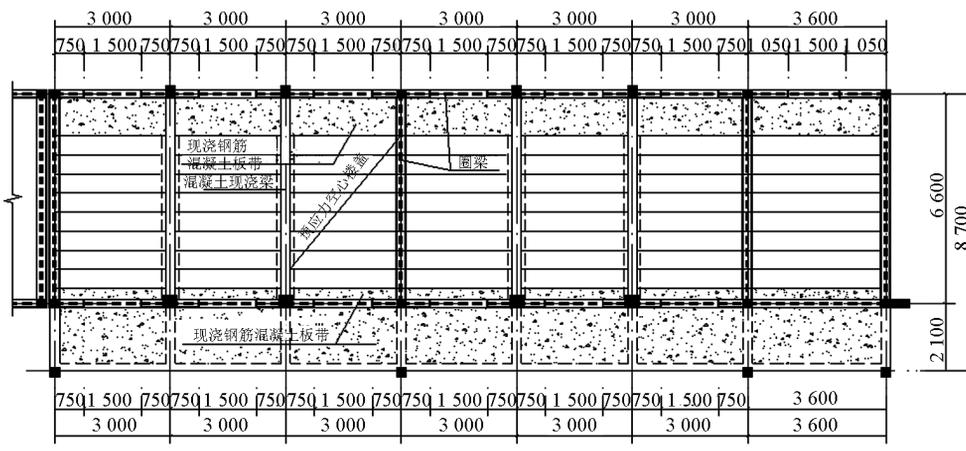


图14 教学楼屋层面圈梁及现浇板带布置图 (单位:mm)

Fig. 14 Layout of the ring beams and cast-in-situ concrete slabs (Unit: mm)

### 3.4 楼梯间墙体抗震设计

当楼梯位于建筑转角处或端头时,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《建筑抗震设计规范》规定:楼梯间不宜设置在房屋的尽端及转角处<sup>[1]</sup>。相对于纵横墙较多的砌体结构,楼梯间抗侧刚度相对较弱,为结构薄弱部位,当楼梯间布置于建筑端头及转角处时,在地震水平作用及结构扭转作用下,楼梯间会破坏严重。笔者认为对于横墙较少的教学楼砌体结构体系,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头是可行的,图15为楼梯间加强措施示意图。这一点在汶川地震中已经得到检验,从地震中发生倒塌的多栋教学楼可以见到,楼梯间未倒塌的,其数量占相当大比例。

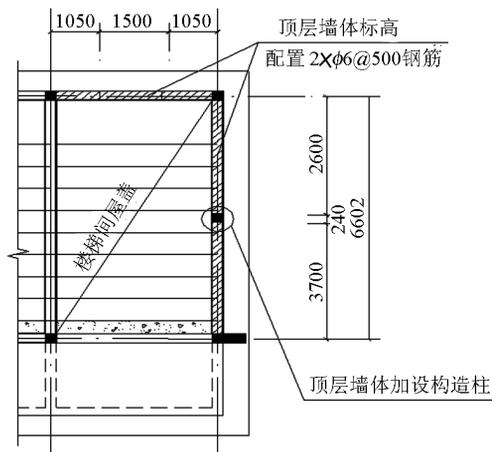


图15 楼梯间加强措施示意图(单位:mm)

Fig. 15 Diagrammatic plan of the strengthening measures for the stair room (Unit: mm)

本项目设计,对于设置在建筑端头的楼梯间,采取了以下几点加强措施:a.除按《建筑抗震设计规范》<sup>[1]</sup>要求,在楼梯间四角设置钢筋混凝土构造柱外,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(240 mm × 720 mm),对墙体提供了较强的侧向约束;b.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中部设置构造柱的措施提高其承载力及变形能力。

## 4 结语

实践需要理论指导,理论需要实践检验。通过104所中小学,尤其是位于地震极重灾区的65所学校教学楼在地震中的表现,笔者对于此类结构的抗震设计,得出如下几点粗浅的认识。

1)在具有脆性特征的砌体结构中,合理设置构造柱和圈梁,形成弱框架结构体系,可增强大开间少墙单面走廊砌体结构的延性和在大震作用下的防倒塌能力。

2)砌体结构应实现“强竖向(窗间墙)、弱水平(窗台墙)”的延性屈服机制。

3)大开间少墙砌体结构中的纵向独立窗间墙是其薄弱部位,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。

4)大开间少墙砌体结构中横墙的中部设置钢筋混凝土构造柱及水平钢筋混凝土腰带,可有效提高抗震能力。

5)在屋面板边缘沿纵墙方向设置钢筋混凝土现浇带,形成“T”形圈梁,可以有效地增强预应力空心楼盖的侧向约束,增大楼盖的整体刚度。只要结构布置合理、构造措施得当以及施工质量得以保证,大开间少墙单面走廊砌体结构中采用预应力空心楼板仍然可以具备较好的抗震性能及抗倒塌能力。

6)由于楼梯间横墙间距小,其刚度较大,可放置于大开间砌体结构的端部,但楼梯间应采取一定的加强措施,保证其墙体的抗垮塌能力。

## 参考文献

- [1] GB 50011-2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国工业出版社,2001

# The seismic analysis and design for the masonry buildings in rural villages located in meizoseismal areas

Feng Yuan, Yi Dan, Bi Qiong

(China Southwest Architecture Design & Research Institute, Chengdu 610081, China)

[Abstract] Based on the characteristics of large spacing masonry buildings with few transverse walls and the seismic hazards on teaching buildings, the authors analyzed the effects of constructional columns and ring beams to the seismic resistance of buildings and presented the concept of improving ductility of buildings. Some suggestions were then proposed for the design of this type of structures.

[Key words] large spacing masonry buildings with few transverse walls; constructional columns; ring beams; ductility; walls between windows