

周强, 孙柏涛, 2010. 汶川地震中极震区砌体结构教学楼典型震害分析. 震灾防御技术, 5(4): 467—476.

# 汶川地震中极震区砌体结构教学楼 典型震害分析<sup>1</sup>

周 强<sup>1)</sup> 孙柏涛<sup>1, 2)</sup>

1) 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001

2) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

**摘要** 汶川 8.0 级大地震造成了巨大的损失, 大量学校建筑遭受严重破坏, 其中大部分是砌体结构教学楼。在此次地震中, 极震区北川县擂鼓镇城区内的初中、小学和幼儿园等砌体结构教学楼的破坏极其严重, 结构特征和震害现象十分典型。本文详细地介绍了擂鼓镇城区内 5 栋砌体结构教学楼的结构构造特点和震害现象特征, 同时, 总结归纳了砌体结构教学楼的典型震害并分析了震害原因; 讨论并分析了建筑含墙率、开间大小、高宽比等因素对建筑的抗震能力的影响; 通过结构易损性分析方法对教学楼在不同烈度下的破坏状态进行了计算, 并与实际震害进行了对比分析; 最后, 为灾后教学楼的重建工作提出了建议。

**关键词:** 汶川地震 砌体结构 教学楼 典型震害分析 易损性分析

## 引言

2008年5月12日, 四川省汶川县(东经 103.4°, 北纬 31°)发生了里氏 8.0 级地震, 震中位于汶川县映秀镇, 震中烈度为 11 度, 中国大半地区有明显震感, 这是新中国成立以来最为强烈的一次地震。据统计, 汶川大地震共造成 50 万间房屋倒塌, 其中包括约 6898 栋校舍。在世界各地发生的历次地震中, 大量学校建筑遭受严重破坏的现象普遍存在, 如台湾 1999 年“9.21”地震中, 办公建筑和医院建筑的破坏率分别为 0.8% 和 0.2%, 而学校建筑破坏率达 2.2% (王亚勇等, 2001); 2003 年土耳其 Bingol  $M_S 6.7$  级地震中, 因大量教学楼的严重破坏, 导致 31000 多名学生无教室上课 (Adem Dogangun, 2004)。教学楼的严重破坏或倒塌是造成大量师生伤亡的最直接原因, 因此引起了社会各界的强烈关注。砌体结构教学楼在我国各地普遍使用, 在汶川地震中砌体结构教学楼的破坏尤为严重, 其抗震性能的好坏与地震中学校师生的人身安全有着密切的联系。

在重灾区北川县, 抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度为 0.1g (中华人民共和国建设部, 2008)。擂鼓镇位于北川县境东南, 距县城 8km, 是县城通往安县和绵阳的门户,

**1 基金项目** 国家 973 计划课题 (2007CB714205)、国家自然科学基金重点项目 (50938006)、科技部国际合作项目 (2010DFA71240) 资助

[收稿日期] 2010-10-11

[作者简介] 周强, 男, 生于 1983 年。博士研究生。主要研究领域: 结构抗震、灾场仿真技术。E-mail: zhouqiang09@hrbeu.edu.cn

幅员面积  $145\text{km}^2$ ，人口 1.7 万，辖 30 个行政村 1 个街道居委会，成青公路穿镇而过。在汶川地震中，擂鼓镇是紧邻北川县城受灾最重的乡镇之一，城区内的初中、小学和幼儿园等教学楼破坏极其严重，震害现象十分典型。

本文依据地震现场实地调查资料，对极震区擂鼓镇城区内的 3 栋初中教学楼、1 栋小学教学楼以及 1 栋幼儿园教学楼，共计 5 栋砌体结构教学楼的建筑概况和震害现象特征予以了详细介绍，并对这些教学楼的典型震害进行了分析，同时结合理论计算进行了讨论，提出了一些建议。

## 1 建筑概况及震损情况（刘恢先，1986；孙柏涛等，2000；中国科学院工程力学研究所，1979；中国石油化工总公司抗震办公室，1991）

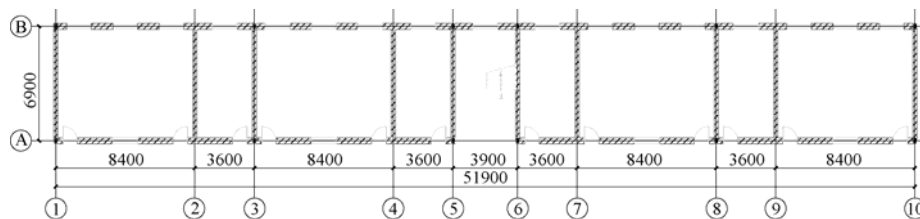
### 1.1 擂鼓镇初中 1 号教学楼（No.1 楼）

#### 1.1.1 建筑概况

该教学楼 1993 年建成，主体 3 层，结构类型为砌体结构，纵横墙承重，纵墙厚 370mm，横墙厚 240mm，楼板及屋盖为预制板，平面布置如图 1（a）所示。该楼设防烈度为 7 度，各层均设有圈梁（构造柱布置见平面简图，下同），砂浆强度等级为 M5，建筑高宽比为 1.4，各层含墙率（即各楼层纵横墙有效断面积之和（扣除门、窗孔）与相应楼层建筑面积的比值）均为 8.39%。

#### 1.1.2 震损情况

震害主要集中在底层，墙体普遍出现通透性贯穿交叉斜裂缝；图 1（a）中 A 和 B 轴上的圈梁及门窗过梁普遍出现严重裂缝，部分断裂，而且主要集中于大开间的教室处，其它部位圈梁震害明显偏轻；墙体普遍沿圈梁底部出现水平裂缝；1 和 10 轴上的构造柱在与圈梁连接处出现严重裂缝，其它构造柱在与圈梁连接处出现明显裂缝。



(a) 一层平面简图



(b) 整体

图 1 擂鼓镇初中 1 号教学楼

Fig. 1 The No.1 teaching building of Leigu junior middle school

2—3 层震害相对较轻。2 层多数墙体出现通透性斜裂缝, 少数墙体出现通透性贯穿交叉斜裂缝; 3 层少数墙体出现通透性斜裂缝。该建筑的震害等级为毁坏。

## 1.2 擂鼓镇初中汉龙教学楼 (No.2 楼)

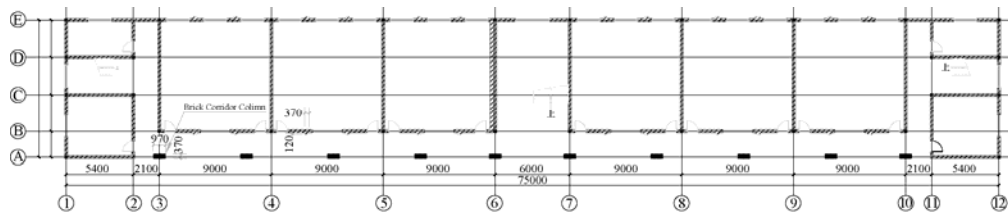
### 1.2.1 建筑概况

该教学楼 2004 年建成, 主体 3 层, 结构类型为砌体结构, 纵横墙承重, 墙厚均为 240mm, 楼板及屋盖为预制板, 平面布置如图 2 (a) 所示。该楼设防烈度为 7 度, 各层均设有圈梁, 砂浆强度等级为 M5, 建筑高宽比为 1.1, 各层含墙率均为 5.94%。

### 1.2.2 震损情况

震害主要集中在底层, 图 2 (a) 中 B 轴向的纵墙大多数出现严重裂缝, 部分倒毁; 窗间砖壁柱普遍断裂、错位; E 轴上的纵墙震害明显轻于 B 轴上的纵墙; 横向墙体的震害轻于纵向墙体; 4、5 轴间的外廊柱倒毁, 其它外廊柱在顶部和底部普遍出现水平裂缝; B 轴与 3、4、5 轴相交处构造柱断裂, 其它构造柱也普遍在门、窗洞口上沿高度附近出现明显裂缝。

2—3 层震害相对较轻, 震害分布与底层相似, 2 层纵墙普遍出现通透性斜裂缝; 3 层部分墙体出现通透性斜裂缝。该建筑的震害等级为毁坏。



(a) 一层平面简图



(b) 整体

图 2 擂鼓初中汉龙教学楼

Fig. 2 Hanlong teaching building of Leigu junior middle school

## 1.3 擂鼓镇初中 2 号教学楼 (No.3 楼)

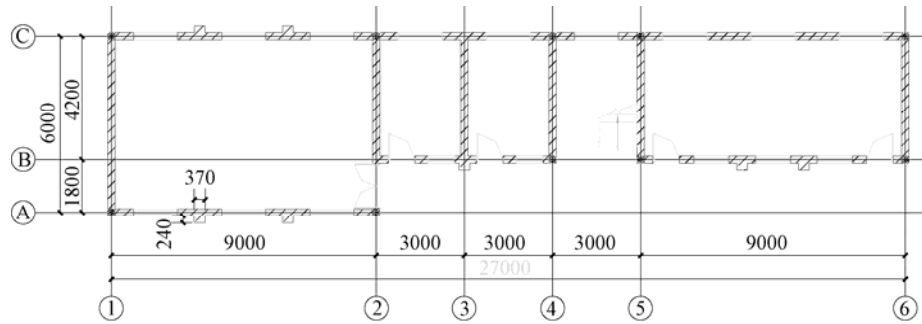
### 1.3.1 建筑概况

该教学楼 1993 年建成, 主体 3 层, 结构类型为砌体结构, 纵横墙承重, 墙厚均为 240mm, 楼板及屋盖为预制板, 平面布置如图 3 (a) 所示。该楼设防烈度为 7 度, 各层均设有圈梁, 砂浆强度等级为 M2.5, 建筑高宽比为 2.4, 各层含墙率均为 7.60%。

### 1.3.2 震损情况

震害主要集中在底层, 大多数楼板掉落, 图 3 (a) 中 3、5 轴间部位倒毁; 纵墙墙体普

遍出现通透性斜裂缝,且多为沿着砖块出现的阶梯型裂缝;A、B、C轴上的纵墙普遍沿圈梁底部出现水平裂缝;1、2、6轴上的横墙出现多道通透性贯穿交叉斜裂缝;C轴与6轴相交处构造柱断裂、露筋。



(a) 一层平面简图



(b) 整体

图3 擂鼓初中2号教学楼

Fig. 3 The No.2 teaching building of Leigu junior middle school

2—3层除中间倒毁部分外,震害相对较轻,震害分布与底层相似;2层多数墙体出现通透性斜裂缝,墙体普遍沿圈梁底部出现水平裂缝;3层震害轻于2层。该建筑的震害等级为毁坏。

#### 1.4 擂鼓镇小学校(No.4楼)

##### 1.4.1 建筑概况

该小学2000年建成,主体3层,结构类型为砌体结构,纵横墙承重,墙厚均为240mm,楼板及屋盖为预制板,平面布置如图4(a)所示。该楼设防烈度为7度,各层均设有圈梁,砂浆强度等级为M5,建筑高宽比为1.5,各层含墙率均为4.34%。

##### 1.4.2 震损情况

以图4(a)中10轴伸缩缝为界,右侧倒毁,未倒一侧震害相对较轻。未倒部分的震害主要集中在底层,横墙震害重于纵墙震害;横墙普遍出现通透性斜裂缝;纵墙普遍出现斜裂缝,少数为通透性斜裂缝,裂缝主要集中于门窗洞口角部;C轴与10轴相交处构造柱在与圈梁连接处出现严重裂缝;外廊柱未见明显破坏。

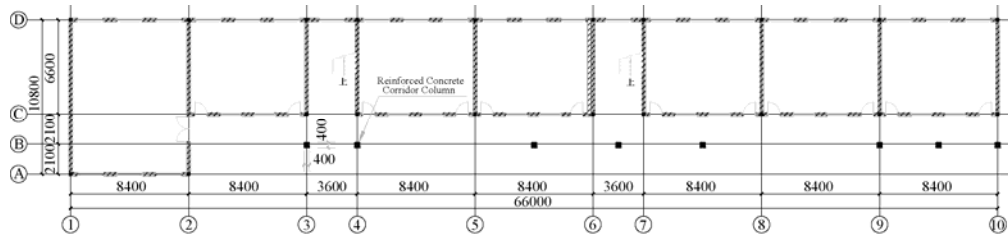
2—3层震害明显轻于底层,震害分布与底层相似。该建筑的震害等级为毁坏。

#### 1.5 擂鼓镇中心幼儿园(No.5楼)

##### 1.5.1 建筑概况

该幼儿园2000年建成,主体3层,结构类型为砌体结构,纵横墙承重,墙厚均为240mm,

楼板及屋盖为预制板，平面布置如图 5 (a) 所示。该楼设防烈度为 7 度，各层均设有圈梁，砂浆强度等级为 M5，建筑高宽比为 1.1，各层含墙率均为 7.87%。



(a) 一层平面简图 (未倒部分)



(b) 整体 (建筑右边部分倒塌)

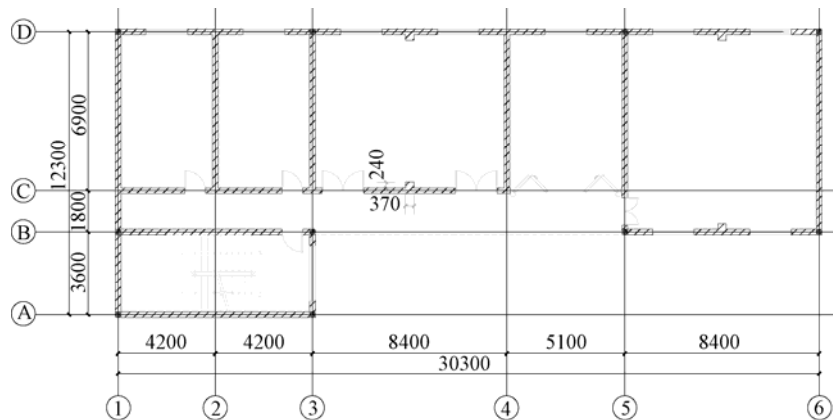
图 4 擂鼓镇小学校

Fig. 4 The building of Leigu primary school

### 1.5.2 震损情况

震害主要集中在底层，图 5 (a) 中 D 轴上介于 3 和 4 轴之间的砖壁柱中部酥碎，另外 3 个砖壁柱均在中部断裂；横墙普遍出现通透性斜裂缝；纵墙中出现的严重裂缝主要分布于 3、4 轴和 5、6 轴间的窗间墙。

2—3 层震害相对较轻，2 层部分横墙体出现通透性斜裂缝；3、4 轴和 5、6 轴间的门窗洞口角部出现通透性斜裂缝；3 层少数横墙出现通透性斜裂缝；纵墙在 3、4 轴和 5、6 轴间的门窗洞口角部出现通透性斜裂缝。该建筑的震害等级为严重破坏。



(a) 二层平面简图



(b) 整体

图 5 擂鼓镇中心幼儿园

Fig. 5 The building of Leigu central kindergarten

## 2 震害分析

### 2.1 典型震害及原因

从历史经验看,地震中砌体结构教学楼的破坏普遍重于其它类型房屋,究其原因,这与其自身结构特征有很大的关系。教学楼因其功能的要求,开间和进深都比较大,为了满足采光和通风需要,纵墙上开有较多门窗洞口,使得纵墙抗剪能力较弱,在地震作用下容易出现破坏。在汶川地震中,擂鼓镇是紧邻北川县城受灾最重的乡镇之一,烈度为 11 度,城区内房屋破坏非常严重。本文所选的初中、小学和幼儿园等教学楼均是当地典型学校建筑,结构特征和震害现象十分典型,具有普遍意义。分析以上砌体结构教学楼的典型震害和原因主要为:

#### (1) 墙体破坏

墙体破坏在各教学楼中普遍存在,裂缝是其主要震害形式。当地震作用平行于纵、横墙时,它们常因受剪强度不足而产生斜裂缝(如图 6 所示),在地震往复作用下进一步形成交叉斜裂缝,当地震作用沿斜向时,纵、横墙均可能出现交叉裂缝(如图 7 所示)。楼板下水平裂缝的出现,通常是由于楼板与墙体连接强度不够,在地震作用时变形不协调而产生。外纵墙和大开间教室的墙体,往往受弯剪作用也容易在窗台和窗顶标高处产生水平裂缝(如图 6、图 7 所示)。



图 6 墙体斜裂缝和水平裂缝(No.4 楼)

Fig. 6 Diagonal and horizontal cracks of masonry wall  
(No.4 building)



图 7 墙体交叉裂缝(No.1 楼)

Fig. 7 Cross cracks of masonry wall  
(No.1 building)

### (2) 纵横墙连接处破坏

纵横墙连接处的破坏主要是由于纵横墙缺少可靠连接，在地震作用下纵横墙连接处往往产生竖向裂缝（如图 8 所示），甚至纵墙外闪或倒塌，特别是处于房屋端部的墙角部位受到相邻结构的约束相对较弱，而地震对房屋的扭转作用对其影响较大，更容易遭受地震破坏。对于设置在纵横墙交接处，特别是房屋端部的构造柱的破坏主要表现为开裂、混凝土酥碎、纵向钢筋断裂等，这与房屋遭受较大的水平地震剪力、整体倾覆力矩及竖向振动等综合因素有关（周铁钢等，2008）。

### (3) 楼梯间局部破坏

楼梯间的刚度一般较大，所承受的地震作用也较大，梯段平台与楼层存在错层，楼板对其约束减弱，空间刚度差，特别是在顶层，墙体较高，稳定性差，当地震烈度较高时，楼梯间墙体会出现局部严重破坏或局部倒塌（如图 9 所示）。



图 8 纵横墙连接处破坏 (No.3 楼)

Fig. 8 Connection damage of longitudinal and cross walls (No.3 building)



图 9 楼梯间倒塌 (No.3 楼)

Fig. 9 Stairwell collapse (No.3 building)

### (4) 楼（屋）盖破坏

楼（屋）盖的破坏主要是由于预制楼板与墙体或梁连接不牢或搁置长度不够而导致楼板错位甚至掉落而引起（如图 8、图 9 所示）。

以上是所调查的 5 栋砌体结构教学楼的一些主要震害特征，此外，还有诸如装饰构件掉落和抹灰掉落等震害。引起以上各教学楼的震害因素很多，归纳起来主要为墙体自身强度不够而产生的破坏，以及结构各构建之间缺乏可靠连接而产生的破坏。

## 2.2 各教学楼震损情况对比分析

通过对上述 5 栋教学楼的建筑概况及震损情况进行对比，可以看出：

(1) 在 No.1、2、3、5 四栋教学楼中，No.3 楼的实际砂浆强度等级最低，而且高宽比最大，在实际震害中出现局部倒毁，震害重于 No.1、2、5 教学楼。

(2) No.2 楼的教室开间和进深最大，其教室墙体的破坏要重于其它教学楼教室的墙体。

(3) No.1、2、4、5 四栋楼的砂浆强度等级相同，高宽比也比较接近，但 No.1 和 No.5 楼的含墙率相对较高，墙体震害轻于含墙率较低的 No.2 和 No.4 楼。

(4) No.3 楼的楼梯间在地震中倒塌，而其它教学楼的楼梯间未倒。

(5) 有开洞墙体在洞口周围出现的震害较多。

(6) 5 栋教学楼的楼(屋)盖均采用预制板, 仅 No.3 楼的楼板出现明显错动和掉落, 其它 4 栋教学楼的楼板震害明显较轻。

### 2.3 小结

通过以上震害分析可知:

(1) 5 栋砌体结构教学楼均经过抗震设计, 在汶川地震中基本上满足了“大震不倒”的抗震设防目标, 可见教学楼这类空旷建筑在经过抗震设计后, 如果施工质量得到保证, 也可以具备较强的抗震能力。

(2) 砂浆强度、开间和进深尺寸、高宽比、含墙率、楼梯间的布置和平立面布置等都是影响结构抗震能力的主要因素。

(3) 与周围砌体结构住宅楼相比, 教学楼的震害普遍较重, 可见开间和进深尺寸以及含墙率是影响结构抗震性能的重要因素。另外, 教学楼窗间墙的破坏通常要重于住宅楼, 这与教学楼窗间墙较窄、房屋空旷有关。

(4) 洞口周围墙体是结构的薄弱部位。

(5) No.2 和 No.3 教学楼的每层均布置有圈梁和构造柱, 地震后首层墙体破坏都非常严重, 但没有出现整体倒塌现象, 说明圈梁和构造柱能有效提高房屋的抗倒塌能力。

(6) 如果预制楼板之间以及与墙体之间连接牢靠, 预制板楼(屋)盖也可具有较好的抗震性能。

## 3 结构易损性计算分析

### 3.1 结构易损性计算

砌体结构地震易损性分析方法(尹之潜等, 2004)以地震加速度峰值为输入参数, 克服了以往以烈度为输入参数的易损性分析方法(尹之潜等, 1996)依赖于地震的宏观现象等缺陷, 并与新地震区划图接轨, 在国内得到了广泛的应用。依据上述 5 栋砌体结构教学楼的实地调查数据, 通过理论计算得到了各教学楼在不同烈度时的超越强度倍率值  $E$ , 然后通过表 1 可查得其震害等级。

表 1 震害等级对应的超越强度倍率的上下限(尹之潜等, 2004)

Table 1 The upper and lower limits of beyond strength correspond to the damage grade (Yin Zhiqian, 2004)

震害等级	无筋砌体房屋的震害等级 与 $E$ 值的分布关系	有构造柱的砌体房屋的震害等级 与 $E$ 值的分布关系
基本完好	$E \leq 1.0$	$E \leq 1.0$
轻微破坏	$1.0 < E \leq 1.3$	$1.0 < E \leq 1.35$
中等破坏	$1.3 < E \leq 1.7$	$1.35 < E \leq 2.10$
严重破坏	$1.7 < E \leq 2.0$	$2.10 < E \leq 2.5$
毁坏	$2.0 < E$	$2.5 < E$

各建筑物底层在不同烈度下的易损性分析结果如表 2 所示。



表 2 各建筑物底层在不同烈度下的震害等级

Table 2 Damage grades of the first floor from different buildings under different intensities

建筑编号	建筑名称	各建筑物底层在不同烈度下的震害等级				
		7 度	8 度	9 度	10 度	11 度
No.1	擂鼓镇初中 1 号教学楼	基本完好	轻微破坏	严重破坏	毁坏	毁坏
No.2	擂鼓镇初中汉龙教学楼	基本完好	中等破坏	毁坏	毁坏	毁坏
No.3	擂鼓镇初中 2 号教学楼	基本完好	中等破坏	严重破坏	毁坏	毁坏
No.4	擂鼓镇小学校	基本完好	中等破坏	毁坏	毁坏	毁坏
No.5	擂鼓镇中心幼儿园	基本完好	轻微破坏	严重破坏	毁坏	毁坏

### 3.2 计算结果分析

通过对各教学楼的实际破坏状态与易损性分析结果进行对比分析, 可知 5 栋教学楼总体上均符合我国抗震规范中“三个水准”的抗震设防目标。在地震烈度为 11 度时, 除 No.5 楼实际震害等级为严重破坏外, 其余各教学楼震害等级的计算结果与实际震害等级基本吻合。事实上, 建筑物的破坏状态是许多震害影响因素综合作用的效果(孙柏涛等, 2008), 在理论上很难对其做全面的考虑, 理论计算结果与实际震害损失之间有时会有一定的差别。

## 4 结束语

汶川大地震造成了大量教学楼的严重破坏和倒塌, 教训是惨重的。鉴于我国当前的经济水平, 对于教学楼这类重要建筑, 砌体结构依旧是其主要结构类型之一, 如何保证砌体结构教学楼的抗震性能是值得关注的。通过对上述 5 栋教学楼的典型震害分析, 我们为灾后教学楼的重建工作提出如下建议:

- (1) 通过在洞口周围墙体配置钢筋等方式, 对其进行适当加强, 以减轻开洞墙体的震害。
- (2) 加强预制板间以及墙体间等结构构件的连接, 以增强结构的整体性。
- (3) 在满足功能要求的情况下, 减小开间和进深尺寸以及洞口数量, 注意结构的平立面及楼梯间布置。
- (4) 如果条件允许, 可适当提高教学楼的抗震设防标准或采用框架结构等抗震性较好的结构类型。
- (5) 加强各项管理, 确保设计和施工质量, 同时做到对建筑的合理使用和适时维护。

## 参考文献

- 刘恢先, 1986. 唐山大地震震害(二). 北京: 地震出版社.
- 孙柏涛, 孙得璋, 2008. 建筑物单体震害预测新方法. 北京工业大学学报, **34** (7): 701—703.
- 孙柏涛, 孙福梁, 李树楨, 菇继平, 杜玮, 2000. 包头西 6.4 级地震震害. 北京: 中国科学技术出版社.
- 王亚勇, 白雪霜, 2001. 台湾 921 地震中钢筋混凝土结构震害特征. 工程抗震, (1): 3—7.
- 尹之潜, 杨淑文, 2004. 地震损失分析与设防标准. 北京: 地震出版社.
- 尹之潜, 1996. 地震灾害及损失预测方法. 北京: 地震出版社.
- 中国科学院工程力学研究所, 1979. 海城地震震害. 北京: 地震出版社.
- 中国石油化工总公司抗震办公室译, 1991. 洛马普里埃塔地震考察. 北京: 地震出版社.

- 中华人民共和国建设部, 2008. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 周铁钢, 赵冬, 2008. “5·12”地震绵竹城区砌体结构房屋震害调查与分析. 西安建筑科技大学学报, **40** (5): 613—618.
- Adem Dogangun, 2004. Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingol Earthquake in Turkey. *Engineering Structures*, **26**: 841—856.

## Seismic Damage Analysis of Typical Masonry Teaching Buildings in Meizoseismic Area of Wenchuan Earthquake

Zhou Qiang<sup>1)</sup> and Sun Baitao<sup>1, 2)</sup>

1) College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

**Abstract** The Wenchuan earthquake with  $M_S$  8.0 caused huge loss and severe damage of school buildings, among which most are masonry teaching buildings. In this earthquake, Leigu town, which adjoins Beichuan county, was the most seriously damaged place. The masonry teaching buildings of middle schools, elementary schools and kindergartens were damaged severely and the architectural feature and earthquake disaster phenomenon are very typical. The characteristics of structures and seismic damage of five masonry teaching buildings in Leigu town are introduced in detail in this paper. At the same time, the typical seismic damage and the damage causes of these masonry teaching buildings are given. The effective factors on seismic behavior such as the wall ratio, bay and height-width ratio are analyzed. By means of structure vulnerability analysis, damage states of these buildings, under different intensity, are calculated and used for comparative analysis with actual damage states. Finally, some reasonable suggestions on the reconstruction of teaching buildings after disaster have been given.

**Key words:** Wenchuan earthquake; Masonry structure; Teaching buildings; Typical seismic damage analysis; Vulnerability analysis