

# 基于 Pushover 方法的中小学砌体结构抗震性能评估\*

王秋维, 史庆轩, 辛高伟

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 针对中小学砌体结构教学楼的受力特点, 提出横墙和开洞纵墙的等代框架模型, 分析了模型的抗弯、抗剪和轴向刚度计算方法; 结合国内外对钢筋混凝土结构性能水平的划分标准, 将砌体结构的性能水平划分为正常使用、中等破坏和生命安全三个阶段, 并通过对大量砌体墙片试验数据的统计, 得出其各性能水平对应的层间位移角限值。最后利用所提模型对一砌体结构教学楼进行 Pushover 分析, 将其实际层间位移与所提性能指标进行比较, 结果表明结构在不同地震水平下均满足预定的性能目标。

**关键词:** 砌体结构; 等代框架模型; 抗震性能水平; 量化指标; 抗震性能评估

**中图分类号:** TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)02-0086-06

中小学教学楼区域一般人口密度高、流动量大而且频繁, 教学和附属生活设施相对集中。由地震灾害以及地震引起次生灾害的可能性和危害性要比其它类型建筑大得多。2008 年汶川 8.0 级地震中, 四川省近 7 000 座学校倒塌, 2010 年玉树 7.1 级地震也已致当地 70% 学校倒塌, 在我国近年来发生的一系列地震中, 校舍成为最易倒塌的建筑群体。

我国中小学校舍主要采用纵墙承重的砌体结构形式, 由于其在设计中追求大开间, 纵墙只有在教室前后墙的位置才会得到横墙的支撑和拉接, 所以稳定性不好。砌体结构形式决定了校舍的抗震性能较差, 若能对现有学校建筑进行抗震评估和鉴定, 并对不满足要求的结构采取适当的加固对策, 那么地震灾害将会大大减轻。本文即在统计砌体结构不同性能水平层间位移角限值的基础上, 提出其基于 Pushover 分析的抗震性能评估方法, 并采用等代框架模型对一具体中小学砌体结构进行抗震性能评估。

模型能更好反映结构的受力特征。等代框架模型是空间杆系模型的一种, 其在砌体结构的非线性分析中得到了广泛应用, 本文即采用此模型对中小学砌体结构进行静力弹塑性分析。

## 1.1 横墙的等代框架模型

最初的等代框架模型是采用对称模型模拟的, 这种模型由两根在上、下两端与刚性梁相连接的柱及对角支撑组成, 其适用于平面墙体和不超过两片在任何部位相互连接的正交墙系统, 如图 1a 所示。但是, 当系统中有两片以上的墙体相互连接时, 由于交叉形式布置的相邻柱很难单独抗弯, 于是本文提出图 1b 所示的改进模型。

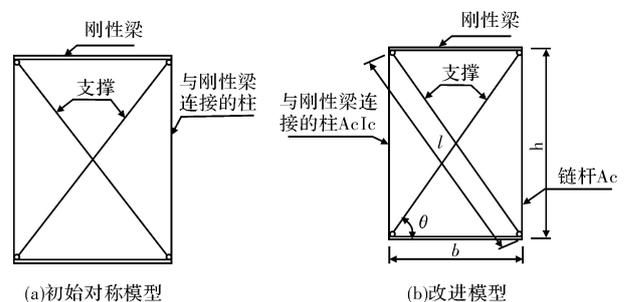


图 1 横墙的等代框架模型

## 1 砌体结构的非线性分析模型

对于砌体结构而言, 空间杆系模型是将墙体等效为框架杆单元, 并利用构件的恢复力特性来计算结构的弹塑性刚度, 其较层间和层间-杆系

等代框架的刚度计算模型如图 2 所示。按照刚度相等的原则, 其抗弯、抗剪和轴向刚度大小可分别通过式(1)~(3)来求解, 在计算过程中, 柱截面积  $A_c$ 、斜撑截面积  $A_d$  和惯性矩  $I_c$  等值通过构

\* 收稿日期: 2010-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50778149); 陕西省抗震救灾专项; 西安建筑科技大学人才科技基金项目(RC1033)

作者简介: 王秋维(1982-), 女, 陕西礼泉人, 博士, 主要从事混凝土结构及其抗震研究. E-mail: wqw0815@sina.com

件的截面属性得到。

$$EI_c + 2EA_c \left(\frac{b}{2}\right)^2 = E \frac{tb^3}{12}, \quad (1)$$

$$\frac{12EI_c}{h^3} + \frac{2EA_d \cos^2 \theta}{l} = \frac{Gbt}{h} = \frac{Ebt}{2(1+\mu)h}, \quad (2)$$

$$\frac{2EA_c}{h} + \frac{2EA_d \sin^2 \theta}{l} = \frac{Ebt}{h}, \quad (3)$$

式中:  $E$  为弹性模量,  $b$ 、 $h$  和  $t$  分别为墙体的宽度、高度和厚度,  $l$  为斜支撑的长度,  $G$  和  $\mu$  则分别表示剪切模量和泊松比。

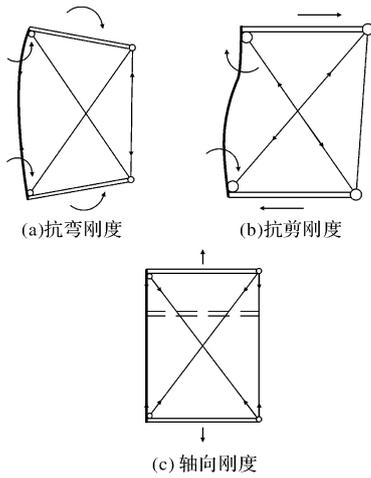


图 2 等代框架的刚度计算模型

### 1.2 开洞纵墙的等代框架模型

开洞纵墙包括墙肢和窗裙梁两部分, 洞口的大小及位置决定了墙肢和窗裙梁相对强弱的变化, 开洞纵墙也因此被分为“强墙肢”和“弱墙肢”两种类型。当墙体为“强墙肢”时, 由于窗裙梁相对薄弱, 其便在地震作用下出现裂缝来耗散地震能量; 对于“弱墙肢”而言, 墙肢则易在地震作用下出现裂缝, 也就是窗间墙部位的裂缝。

不管开洞纵墙发生哪种形式的破坏, 窗裙梁与窗间墙交叉的节点部位则一直保持不坏, 因此可以用这样的等效框架模型来模拟开洞纵墙: ①采用相同刚度的框架柱单元模拟墙肢, 而以相同刚度的框架梁单元模拟窗裙梁; ②采用带刚域的节点连接单元模拟墙肢与窗裙梁相交的节点区。图 3 为纵墙的等代框架模型示意图。

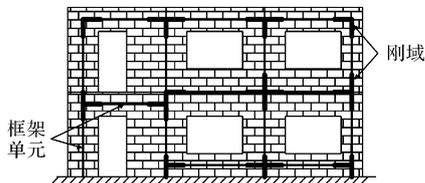


图 3 纵墙的等代框架模型

## 2 砌体结构的抗震性能评估

### 2.1 抗震性能水平

对结构进行抗震性能评估的前提是确定其性能水平, 而不同国家和机构对性能水平的划分规定也不尽相同。美国加州工程师学会 (SEAOC) 将结构的抗震性能水平划分为充分运行、运行、生命安全和接近倒塌 4 档<sup>[1]</sup>, 美国联邦紧急救援署 FEMA 则进行了更为细致的划分, 其定义了 4 个非结构性能水平、三个结构性能水平和两个结构性能范围, 最终对建筑物确立了基本完好、轻微破坏、生命安全和防止倒塌 4 个性能水平<sup>[2]</sup>。我国《建筑工程抗震性态设计通则(试用)》(CECS160:2004)采用充分运行、运行、基本运行、生命安全和接近倒塌 5 个性能水平<sup>[3]</sup>, 而国际结构混凝土联合会(简称 FIB)在总结各国划分标准的基础上, 提出 6 个性能水平, 分别为损伤出现、正常运作、能继续居住、可修复、生命安全和预防倒塌<sup>[4]</sup>。

结合上述对抗震性能水平的划分标准, 依据我国现行《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)小震不坏、中震可修和大震不倒的抗震设防目标<sup>[5]</sup>, 本文从安全性、损伤状况、经济可修复性等方面出发, 将砌体结构的性能水平分为正常使用、中等破坏和生命安全三档, 其分别对应于主体结构处于弹性阶段、弹塑性阶段和塑性阶段, 各性能水准的定义与描述如表 1 所示。

表 1 砌体结构的性能水平及宏观描述

性能水平	不同性能水平的极限状态描述
正常使用	墙体基本保持原有的强度和刚度, 处于弹性工作阶段, 开始出现细小的斜裂缝, 荷载约为极限荷载的 40%~60%, 无任何残余变形。
中等破坏	墙体丧失了部分刚度和强度, 进入弹塑性工作状态, 斜裂缝开始发展, 墙心附近出现对角方向的阶梯形裂缝, 细微裂缝延伸至约束墙体的构造柱。
生命安全	墙体丧失了大部分强度和刚度, 进入塑性工作阶段, 墙的两侧出现新的交叉裂缝, 并充分开展, 荷载下降到极限荷载的 90% 左右, 但能保持不倒状态。

### 2.2 性能评估指标

目前, 我国关于砌体结构的抗震性能评估指标还没有形成统一认识。结合结构不同性能水平的变形特点, 本文在收集开洞和未开洞砌体墙片相关试验的基础上<sup>[6-14]</sup>, 通过统计方法确定了两类墙体在各阶段的极限位移角。墙片在正常使用、

中等破坏和生命安全性能水平的位移角统计结果分别如图4、图5和图6所示。

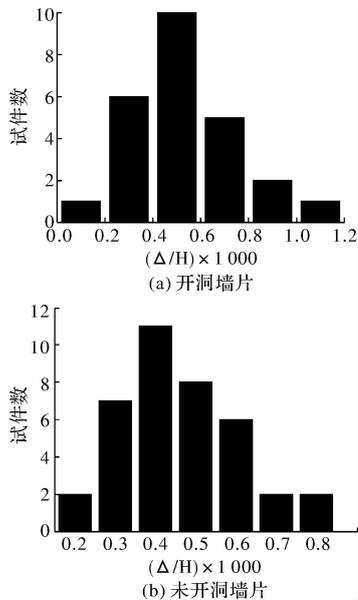


图4 正常使用性能水平位移角统计图

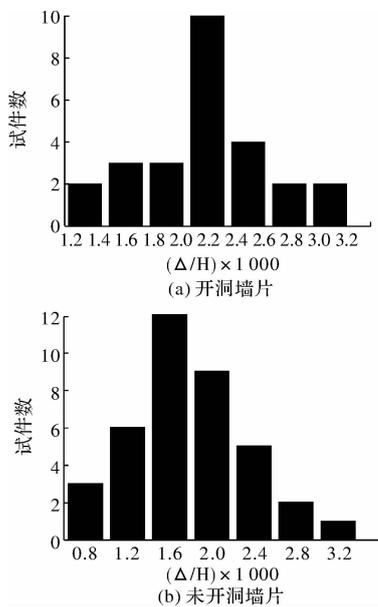


图5 中等破坏性能水平位移角统计图

分析以上统计结果, 可得开洞和非开洞墙片在不同状态的平均层间位移角如表2所示。

表2 砌体结构各性能水平的层间位移角限值

墙片类型	正常使用	中等破坏	生命安全
开洞	1/2 197	1/534	1/195
非开洞	1/2 313	1/614	1/227

可以看出, 开洞墙片各性能水平的位移角值要大于非开洞墙片, 但是两者的差别不大。本文结合试验数据统计结果, 并忽略两类墙片位移角的差别, 提出砌体结构正常使用、中等破坏和生

命安全性能水平对应的层间位移角限值分别为 1/2 500、1/900 和 1/250。

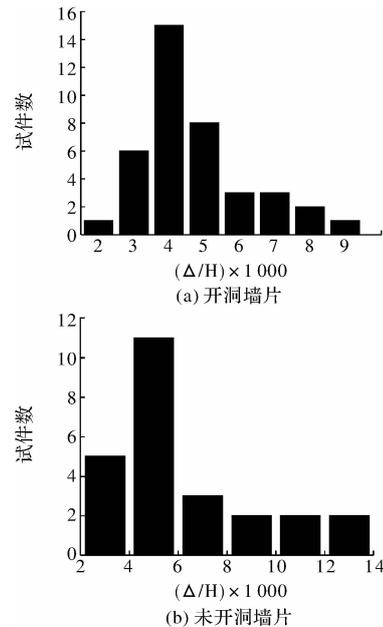


图6 生命安全性能水平位移角统计图

### 3 算例

某5层中学教学楼, 结构形式为单跨外廊式砌体结构<sup>[15]</sup>。结构层高3.6 m、开间3.3 m, 开间数量13个, 楼梯设在结构中间部位, 房间进深6.9 m, 走廊宽度2.1 m, 如图7所示。结构的外墙厚度为370 mm, 内墙厚度240 mm, 墙体材料为M20烧结普通粘土砖, 砂浆强度等级为M10。结构位于8度区二类场地( $T_g=0.35$  s), 设计基本地震加速度为0.20 g, 设计地震分组为第一组。

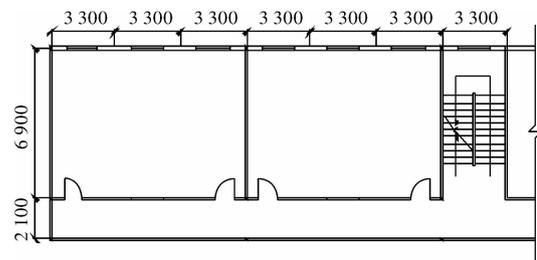


图7 结构平面示意图

采用目前广泛应用的静力非线性(Push-over)分析方法对砌体结构中小学教学楼进行抗震性能评估, 由于篇幅有限, Pushover方法的基本原理和实施步骤可参考相关文献[16-17]。

#### 3.1 模型建立

采用本文前述所提的等代框架模型, 横墙沿宽度方向等分为三份, 等代框架柱、链杆、支撑

的特征值计算结果分别为: 柱  $A_c = 0.0996 \text{ mm}^2$ 、 $I_c = 0.112 \text{ mm}^4$ , 链杆  $A_c = 0.0996 \text{ mm}^2$ , 斜撑  $A_d = 0.353 \text{ mm}^2$ 。图 8 是利用有限元分析软件 SAP2000 建立的结构等代框架模型图。

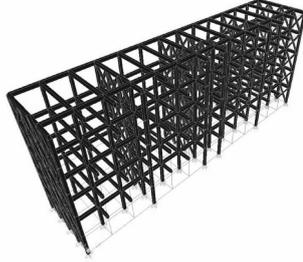


图 8 结构三维模型图

### 3.2 分析结果

通过 Push-over 分析得到结构 X 方向和 Y 方向的基底剪力 - 顶点位移曲线如图 9 所示。

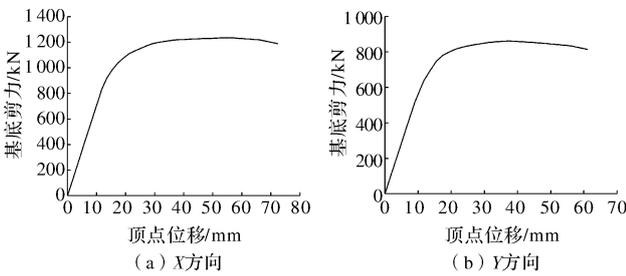


图 9 结构的基底剪力 - 顶点位移曲线

由图 9 可知, 结构在 X 方向的基底剪力大于 Y 方向, 其值已达到 1 235.63 kN, 分析原因主要是

此方向的结构刚度较大。将所得 Push-over 曲线转化为等效单自由度的能力谱曲线, 并将其与规范反应谱转换所得需求谱绘于同一坐标系, 如图 10 所示, 其中能力曲线与多遇和罕遇地震需求谱曲线的交点为结构性能点。从所得塑性铰分布图来看, 结构底层破坏最为严重, 向上逐渐减轻, 同时破坏主要集中在等代框架单元的中间部位, 即窗间墙和窗上墙等被洞口削弱的部位。

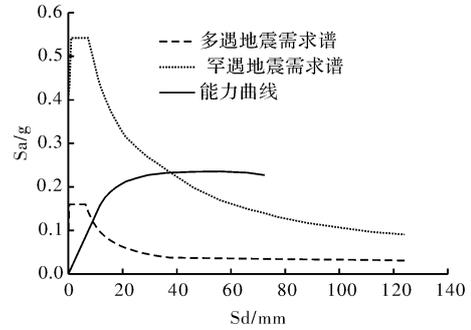


图 10 能力谱与需求谱曲线

同时, 通过分析得到了结构纵横墙在小震、中震和大震作用下的层间位移角 (表 3、表 4)。结构的纵横墙体在小震作用下均处于正常使用状态; 中震作用下的最大层间位移角 (1/1 090) 出现在纵向墙体, 此时结构发生中等破坏, 但仍满足本文所提性能水平以及我国现行规范中震可修的要求; 大震作用下的最大层间位移角 (1/265) 出现在纵向墙体底层, 此时结构满足生命安全性能指标而不会发生倒塌。

表 3 结构纵向墙体的层间位移角及性能水平

楼层	小震		中震		大震	
	层间位移角	性能水平	层间位移角	性能水平	层间位移角	性能水平
1	1/2 680	正常使用	1/1 090	中等破坏	1/265	生命安全
2	1/2 850	正常使用	1/1 250	中等破坏	1/320	生命安全
3	1/3 260	正常使用	1/1 420	中等破坏	1/385	生命安全
4	1/4 390	正常使用	1/1 850	中等破坏	1/540	生命安全
5	1/5 700	正常使用	1/2 120	中等破坏	1/840	生命安全

表 4 结构横向墙体的层间位移角及性能水平

楼层	小震		中震		大震	
	层间位移角	性能水平	层间位移角	性能水平	层间位移角	性能水平
1	1/3 940	正常使用	1/1 470	中等破坏	1/480	生命安全
2	1/4 630	正常使用	1/1 850	中等破坏	1/590	生命安全
3	1/5 060	正常使用	1/2 230	中等破坏	1/720	生命安全
4	1/5 480	正常使用	1/2 780	正常使用	1/890	生命安全
5	1/6 890	正常使用	1/3 420	正常使用	1/1 250	中等破坏

## 4 结论

(1)为便于进行砌体结构的静力非线性分析,提出横墙和开洞纵墙的等代框架模型,以及分析了其抗弯、抗剪和轴向刚度计算方法;

(2)考虑安全性和经济性等因素,将砌体结构的抗震性能水平划分为正常使用、中等破坏和生命安全三档,通过对大量砌体墙片试验数据的统计,提出其在不同性能水平下的层间位移角限值;

(3)利用所提模型对一幢五层砌体结构教学楼进行 Push-over 分析,得到了其基底剪力-顶点位移曲线和各层层间位移,并采用本文所提抗震性能指标对结构进行评估,结果表明其在不同地震水平下均满足预定的性能目标。

(4)所提等代框架模型可以模拟结构大多数部位的破坏,但对于墙片裂缝的具体开展形式还不能模拟,此方面的研究需要深入开展。

## 参考文献:

- [1] California Office of Emergency Services. Vision 2000: Performance based seismic engineering of buildings [S]. California: Structural Engineering Association of California, Vision 2000 Committee, 1995.
- [2] Federal Emergency Management Agency. FEMA 356 - Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [3] 中国工程建设标准化协会. CECS160: 2004 建筑工程抗震性态设计通则(试用)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [4] FIB. 钢筋混凝土建筑结构基于位移的抗震设计[R]. 白绍良, 译. 洛桑: 国际结构混凝土联合会(FIB)(原欧洲混凝土学会 CEB), 2003.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [6] 史庆轩, 易文宗, 刘伯权. 多孔砖砌体开窗洞纵墙片的抗震性能研究[J]. 世界地震工程, 2000, 16(2): 30-34.
- [7] 程才渊, 朱伯龙, 王晓敏, 等. 在低周反复荷载作用下灰砂砖墙体的抗震性能[J]. 四川建筑科学研究, 1989(3): 5-9.
- [8] 朱伯龙, 吴明舜, 将志贤. 在周期荷载作用下砖砌体基本性能的试验研究[J]. 同济大学学报, 1980(2): 1-14.
- [9] 董竟成, 王有为, 宋西战. 多孔砖(KP\_1型)建筑抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1991(3): 35-43.
- [10] 湛华. KP\_1型烧结页岩粉煤灰多孔砖墙体抗震抗剪性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [11] 史庆轩, 易文宗. 多孔砖砌体墙片的抗震性能试验研究及抗倒塌能力分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2000, 32(3): 271-275.
- [12] 易文宗, 史庆轩, 李建. 六层大开间多孔砖砌体房屋的动力特性测试与分析[J]. 建筑结构, 1996(3): 3-10.
- [13] 夏敬谦, 丁世文, 崔际枫, 等. 水平配筋墙片抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1999(6): 37-40.
- [14] 孙雪梅, 刘伟庆. 大开间约束砖砌体开窗洞墙片的拟静力试验研究[J]. 工程抗震, 2004(2): 31-34.
- [15] 辛高伟. 基于 Pushover 方法的砌体结构中中小学建筑抗震性能评估[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- [16] 汪梦甫, 周锡元. 关于结构静力弹塑性分析(Push-over)方法中的几个问题[J]. 结构工程师, 2002(4): 17-22.
- [17] 叶燎原, 潘文. 结构静力弹塑性分析(push-over)的原理和计算实例[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(1): 37-51.

# Seismic Performance Evaluation of Masonry Structures Based on Push-over Method for Primary and Middle School Buildings

Wang Qiuwei, Shi Qingxuan and Xin Gaowei

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The equivalent frame model of cross wall and longitudinal wall with holes are proposed based on stress characteristics of masonry structures for primary and middle school buildings, and calculation methods of bending rigidity, shear resistance and axial stiffness about the model are analyzed. Performance levels of masonry structures, combining with division standards for the levels of reinforced concrete structures at home and abroad, are divided into three levels with corresponding story drift angle limitation obtained after statistical test data as normal service, moderate damage and life safety. Push-over analysis by the proposed models are done to a masonry teaching building, and the result indicates that the structure could meet predetermined performance objective under different earthquake levels by comparison between the practical story drift and proposed performance index.

**Key words:** masonry structure; equivalent frame model; seismic performance level; quantitative index; seismic performance evaluation