

# 基于 Pushover 的中小学框架校舍抗震性能研究

林树枝<sup>1,2</sup>, 袁兴仁<sup>1</sup>, 黄建南<sup>2</sup>, 王晓莉<sup>3</sup>

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门市建设与管理局, 福建 厦门 361003;  
3. 中国建筑科学研究院厦门科研设计部, 福建 厦门 361002)

**摘要:**既有框架校舍由于所建年代不同,设计所依据的抗震规范不一样,因而其抗震性能好坏呈现年代性。Pushover 方法是一种静力弹塑性分析方法,广泛应用于结构抗震性能分析,本文通过三个依据不同抗震规范设计的框架模型进行 Pushover 分析,研究不同时期框架校舍抗震性能的差异。研究表明,早期按 TJ 11-78 设计的框架校舍抗震性能较差,后来按 GB J11-89 设计的框架校舍抗震性能有较大提高,目前按 GB 50011-2001 设计的框架校舍抗震性能最好。

**关键词:**框架校舍; 抗震性能; Pushover

**中图分类号:** TU244.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0985(2011)03-0259-05

中小学校是国家培养建设人才的基地,其人员密度高、活动频繁、流动量大,因而其肩负的公共职能不可小视,加之中小学生的自救能力比较差,如果建筑的抗震能力不足,一旦遭遇到灾害性地震发生,造成的人员伤亡不可估量。回顾国内外历次地震,给我们的教训都是惨痛的。5·12 汶川地震中,遇难和失踪的学生人数达 5335 人。

在中小学校舍建筑中,框架结构的抗震性能相对其它结构形式来说是较好的,但是由于所建年代不一样,依据的抗震设计规范和设防分类标准不一样,不同时期的框架校舍抗震性能相差较大。我国的抗震设计规范主要经历了 TJ 11-78<sup>[1]</sup>、GB J11-89<sup>[2]</sup>和 GB 50011-2001<sup>[3]</sup>三个版本,抗震设防要求是逐渐提高的。

在我国,建筑结构抗震能力的评估方法主要分为两大类:确定性评估方法和非确定性评估方法<sup>[4]</sup>。目前,确定性评估方法被广泛使用,确定性评估方法大致可以归纳为以下几类:①经验评估法;②振动测量评估法;③规范校核法;④能量法;⑤简化的弹塑性分析评估方法;⑥以地震影响系数为指标的反应谱法。在国外主要有简化非线性分析方法和以一个抗震指标作为抗震能力评估的方法等。

## 1 Pushover 的基本原理和实施步骤

### 1.1 基本原理

Pushover 方法<sup>[5]</sup>也称静力弹塑性分析方法,是根据房屋的结构特点在房屋上施加某种分布的水平力,并逐渐增大。随荷载的不断增大,一部分构件进入弹塑性阶段,结构刚度发生变化,因此又逐步调整水平力的分布。这样不断进行下去,直到结构达到某个极限状态(丧失承载能力)。通过这个推覆过程得到结构的  $P-\Delta$ (力-位移)曲线,结合地震需求曲线计算目标位移,并对结果进行评价。

### 1.2 实施步骤

本文采用 ATC-40<sup>[6]</sup>中提供用于静力非线性分析的方法——能力谱法。该方法有 3 种实施形式,其中 Procedure A 和 Procedure B 适合采用电子表格快速计算求解,Procedure C 采用图解法。下面仅简要介绍 Procedure B 实施过程(图 1~4)。

(1) 通过选用适当的侧向力分布形式对结构实施逐级加载,得到结构的 Pushover 曲线,并将其转化为 ADRS (acceleration-displacement response spectrum) 格式的能力谱,将能力谱和需求谱置于同一坐标下。

(2) 建立适合建筑结构所在场地条件和 5% 阻尼的弹性反应谱。但由于我国抗震规范提供的是传统的  $S_a-T$  格式的反应谱,因此需按以下公式转化为 ADRS 格式的需求谱:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ag}; S_v = \frac{T}{2\pi} S_v; S_a = \frac{2\pi}{T} S_v$$

收稿日期: 2011-06-17

作者简介: 林树枝(1963-),男,福建厦门人,教授,博导,研究方向为高层建筑结构及结构抗震(E-mail: shuzhi@public.xm.fj.cn)

式中:  $S_a$ 、 $S_d$  和  $S_v$  分别为谱加速度、谱位移和谱速度(下标  $a$ 、 $d$  和  $v$  分别代表加速度、位移和速度)  $T$  为周期;  $g$  为重力加速度。

(3) 建立一系列折减后的需求谱。等效阻尼介于 10% ~ 35% 并与能力谱置于同一坐标系下(图 1)。

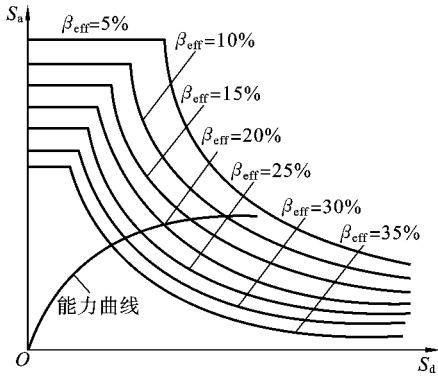


图 1 建立需求谱

(4) 建立双线性模型。初始轴斜率用结构的初始刚度, 采用等效近似位移法确定试验点, 调整屈服后直线斜率, 使图 2 中阴影面积  $A_1 = A_2$ 。

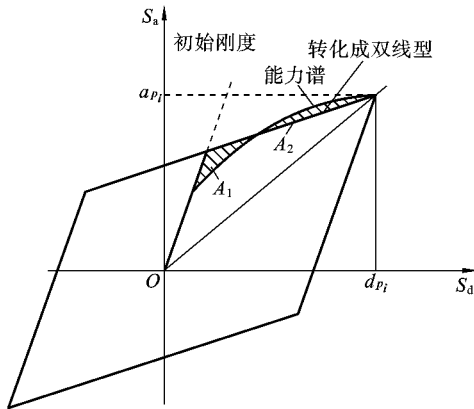


图 2 计算等效粘滞阻尼

(5) 计算试验点( $a_{p_i}$ ,  $d_{p_i}$ ) 及其附近处(能力谱上)的等效阻尼  $\beta_{eff}$ , 则有一系列点( $d_{p_i}$ ,  $\beta_{eff}$ ), 并将这些点置于坐标系中(图 3 中  $a_{p_i}$ 、 $d_{p_i}$  分别代表第  $i$  个试验点的谱加速度和谱位移, 其中  $p_i$  代表第  $i$  个试验点)。

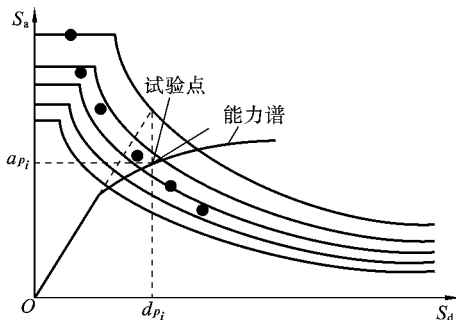


图 3 系列点的分布

(6) 将这一系列点用平滑曲线连接, 与能力谱相交(图 4)。如果该交点和试验点的误差在容差范围以内, 则认为该交点即为性能点; 如不满足, 则应采取其他方法。

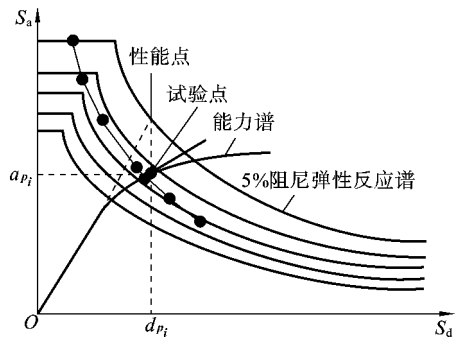


图 4 确定性能点

## 2 工程实例

根据厦门市中小学校舍抗震安全普查的结果, 在 2001 年以前建造的框架校舍主要为单跨悬挑走廊的结构形式, 2001 年后出现了外带走廊柱的结构形式。目前, 厦门抗震设防基本烈度为 7 度(0.15g)。为研究不同时期框架校舍的抗震性能差异, 分别按当时抗震设计规范设计三栋框架校舍(框架 A、框架 B 和框架 C)。本文采用 Midas/Gen 软件建立三维模型(图 5), 对三个框架进行 Pushover 分析。

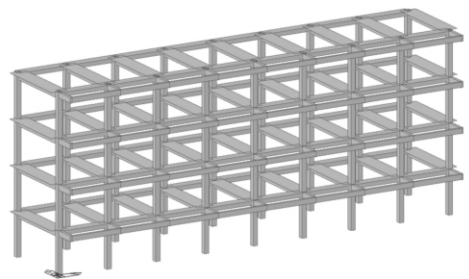


图 5 三维模型

### 2.1 原设计框架基本数据

框架 A 和 B: 轴网尺寸为 4.5 m × 6.6 m, 横向为单跨悬挑结构, 按照 TJ 11-78 设计, 原设防烈度为 7 度(0.1g), 平面布置如图 6。主要框架梁截面尺寸为 250 × 600, 250 × 450; 框架柱截面 400 × 450。

框架 C: 轴网尺寸为 4.5 m × 6.6 m, 横向为双跨框架结构, 按照 GB 50011-2001 设计, 原设防烈度为 7 度(0.15g), 平面布置如图 7。主要框架梁截面尺寸为 250 × 600, 250 × 450; 框架柱截面 400 × 450、350 × 350。

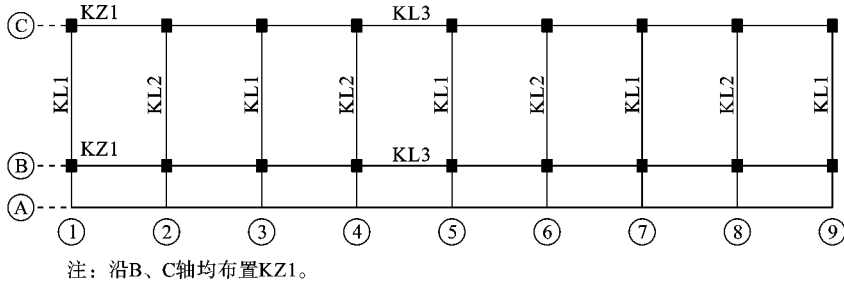


图6 框架A和框架B结构平面布置

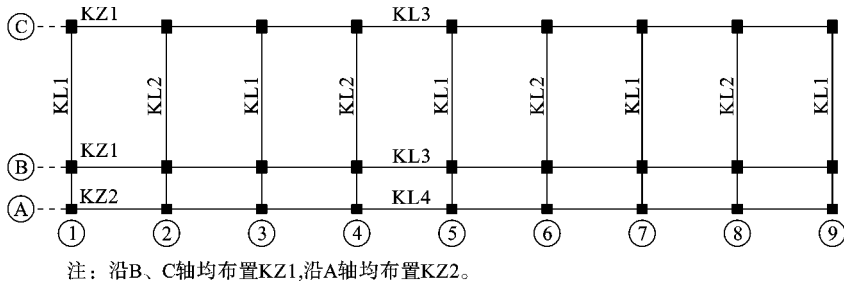


图7 框架C结构平面布置

2.2 Midas 建模

根据文献的研究,为更好反映框架破坏模式,应考虑现浇楼板及楼板配筋对框架梁的影响。本文采用T形梁,按照ACI规范[8],有效板宽为梁每侧6倍板厚,楼板配筋采用板顶板底φ10@200。框架柱配筋按实际配筋输入,框架梁配筋为梁截面内实际配筋加上梁两侧有效板宽范围内的楼板实配配筋。

2.3 Pushover 分析参数设置

梁柱配筋采用按各时期建筑设计规范所设计的框架实配面积,结构初始荷载选择1.0恒载+0.5活载,然后在结构侧向施加倒三角形水平荷载(即采用第一模态),采用水平位移控制,X向和Y向水平目标位移均为500mm。梁铰采用M铰,柱铰采用P-M互相耦合的铰。

2.4 Pushover 结果分析

2.4.1 能力曲线

由Pushover推覆可以得到三个模型的顶点位移-基底剪力曲线,如图8和9。按78规范设计的框架A抗震能力最差;而框架C抗震能力最

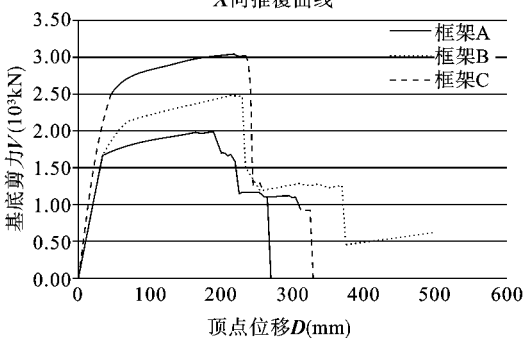


图8 纵向框架能力曲线对比

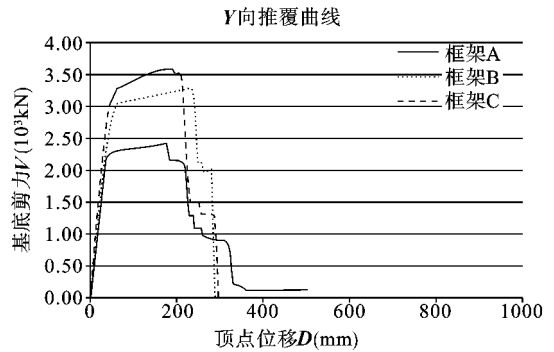


图9 横向框架能力曲线对比

好,抗震能力大约比框架A提高了50%。由于框架A和框架B按单向框架设计,纵向刚度较少,因而纵向框架抗震能力比横向差。

2.4.2 大震下性能点分析

为验证结构在7度(0.15g)大震下的抗倒塌能力,将能力谱与需求谱置于同一坐标下,看是否有交点。由表1可知,三个框架均能满足大震不倒的要求。

表1 各框架性能点(S<sub>a</sub>, S<sub>d</sub>)

	框架A	框架B	框架C
纵向	(0.140 0.055)	(0.165 0.055)	(0.190 0.050)
横向	(0.172 0.047)	(0.227 0.049)	(0.228 0.045)

注:表中性能点坐标单位(g, m)。

2.4.3 推覆至性能点过程塑性铰发展

本文选用塑性铰的骨架曲线为FEMA提供的四折线,B、C、D、E点分别代表塑性屈服点、结构极限强度、残余强度、结构的破坏。IO代表立即使用,LS代表生命安全,CP为防止倒塌。

(1) 纵向框架

由图10可知,在整个推覆过程中,三个框架

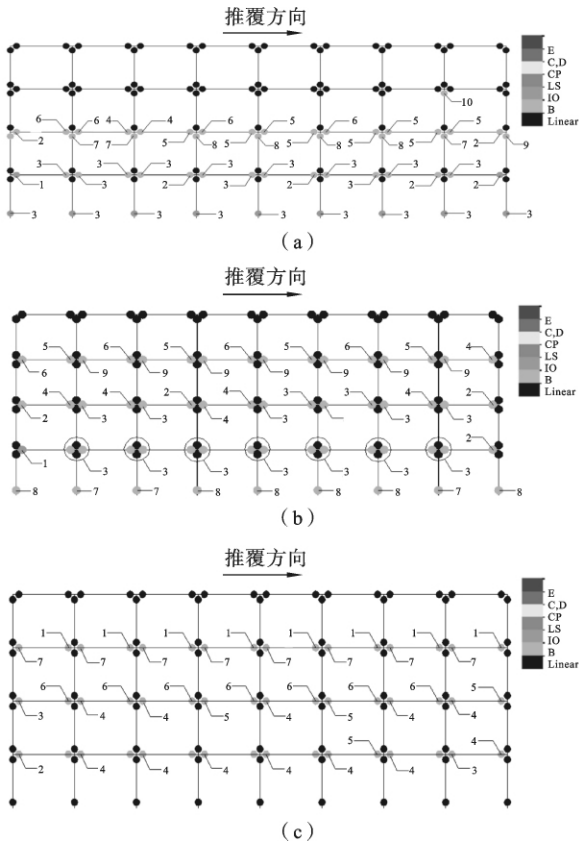


图10 纵向框架推覆至性能点塑性铰发展过程 (图中数字表示铰出现顺序)

首先出现塑性铰都是由于梁端受正弯矩屈服引起的。在大震作用下, 框架 A 和框架 B 底层柱脚均出现了塑性铰, 框架 C 由于柱纵筋配筋较多, 因而都未出现柱铰。

(2) 横向框架

由图 11 可知, 在整个推覆过程中, 框架 A 在底层柱脚和梁端首先出现塑性铰; 框架 B 塑性铰首先在梁端出现, 最后在底层柱脚出现; 框架 C 首先在走廊跨梁端出现塑性铰, 整个过程除走廊柱外基本未出现柱铰。

2.4.4 大震下层间位移角

由图 12 可知, 在 X 向大震作用下, 框架 A 最大层间位移角出现在底层, 为 1/133; 框架 B 和 C 均出现在二层, 分别为 1/135 和 1/163; Y 向大震作用下, 框架 A 最大层间位移角出现在底层, 为 1/164; 框架 B 和 C 均出现在二层, 分别为 1/160 和 1/187。三框架均能满足最大层间位移小于 1/50 的要求。框架 C 的 X 向地震下最大层间位移角较框架 A 和框架 B 有明显减小的趋势, 这说明双跨框架对控制侧移更有利。

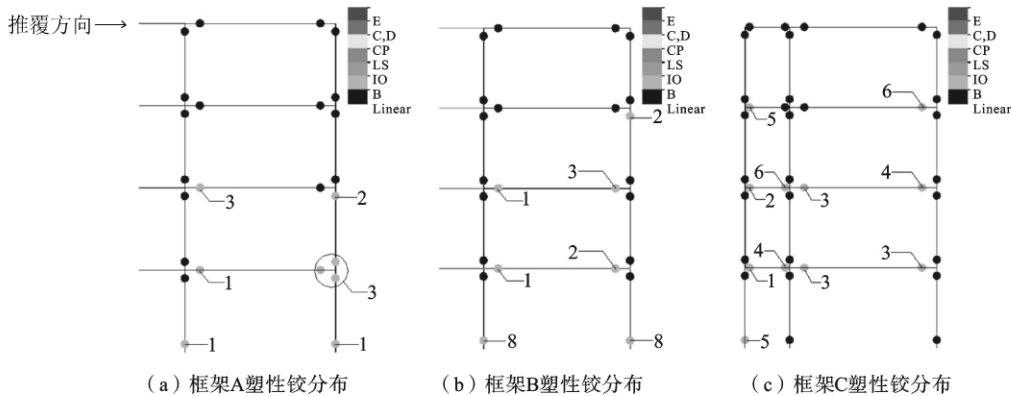


图 11 横向框架推覆至性能点塑性铰发展过程(图中数字表示铰出现顺序)

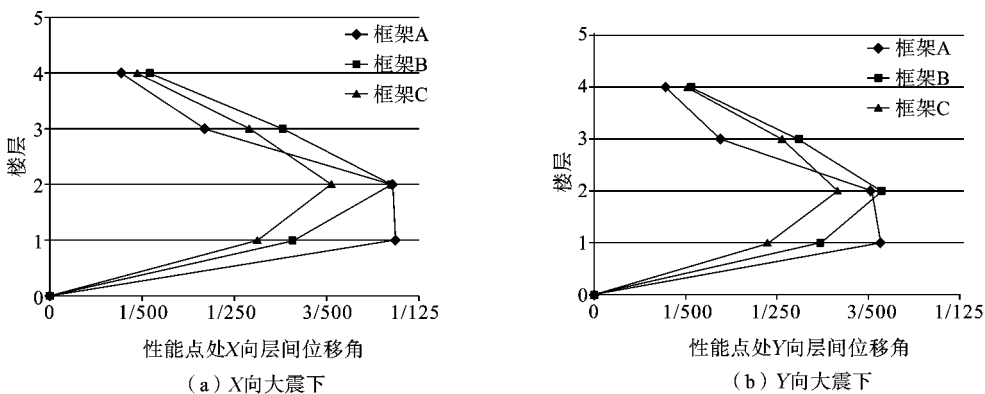


图 12 性能点处层间位移角

### 3 结 语

按 1989 版《建筑抗震设计规范》设计建筑物的抗震能力比 1978 版有显著提高,2001 版比 1989 版略有提高,尤其是柱的承载力和延性提高明显。

按照 TJ 11-78、GB J11-89 和 GB 50011-2001 规范设计的框架校舍能够经受大震不倒的考验。为实现“强柱弱梁”,在结构设计时应考虑现浇板及配筋对框架梁承载力和刚度的影响,加大底层柱的纵筋配筋量。

外加走廊柱的双跨框架抗震性能比单跨框架好,具有更多冗余度,抗倒塌能力更高。中小学框架校舍应按双向框架设计,防止两向框架抗震能力相差过大。

### 参 考 文 献

- [1] TJ 11-78,工业与民用建筑抗震设计规范[S].
- [2] GB J11-89,建筑抗震设计规范[S].
- [3] GB 50011-2001,建筑抗震设计规范[S].
- [4] 杨仕升. 钢筋混凝土结构抗震能力评估研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006.
- [5] 陆新征. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [6] Applied Technology Council ATC-40 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings [S]. Los Angeles California Seismic Safety Commission, 1996.
- [7] 叶列平, 曲哲, 马千里, 等. 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): 52-59.
- [8] Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI318-02) and Commentary (ACI318R-02) [S]. ACI Committee 318, 2002.

## Study on Seismic Performance of Framework School Buildings by Pushover Method

LIN Shu-zhi<sup>1,2</sup>, YUAN Xing-ren<sup>1</sup>, HUANG Jian-nan<sup>2</sup>, WANG Xiao-li<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Construction and Administration Bureau, Xiamen 361003, China;

3. Xiamen Branch of China Academy of Building Research, Xiamen 361002, China)

**Abstract:** Existing framework school buildings built in different age, designed according to different codes for seismic design of buildings, so their seismic performance have epoch character obviously. The pushover method is a static elastic-plastic analysis, used widely in study of structure seismic performance. This paper study seismic performance of three different school buildings built in different age designed by three seismic codes by Pushover analysis. The results show that, compared with model designed by GB J11-78, the seismic performance of model designed by TJ 11-89 are improved obviously, the model designed by GB 50011-2001 is best.

**Key words:** framework school buildings; seismic performance; pushover