

常亚峰,梁兴文,汪平,等.隔震防倒塌支座及楼梯间位置对框架结构抗震性能的影响研究[J].地震工程学报,2017,39(6):996-1004.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.996.

CHANG Yafeng, LIANG Xingwen, WANG Ping, et al. Influence of Isolation and Collapse Prevention Bearings and Location of Stairwells on the Seismic Performance of Frame Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 996-1004. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.996.

## 隔震防倒塌支座及楼梯间位置对框架结构 抗震性能的影响研究<sup>①</sup>

常亚峰<sup>1,2</sup>, 梁兴文<sup>1</sup>, 汪平<sup>1</sup>, 辛力<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082;  
3. 中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

**摘要:**为研究梯段板下端设置隔震防倒塌支座和楼梯间位置对钢筋混凝土框架结构抗震性能的影响,利用ETABS软件建立不包括、包括隔震防倒塌支座的3种楼梯间布置方案,6个框架结构计算模型。通过模态分析、反应谱分析和Pushover分析,研究隔震防倒塌支座和楼梯间位置对框架结构的振型、内力及破坏机制的影响。结果表明:梯段板下端设置隔震防倒塌支座后,楼梯间位置对钢筋混凝土框架结构的扭转效应影响较小,且框架结构在两个主轴方向的动力特性比较接近;楼梯间框架柱内力均显著降低,但楼梯间布置在最边跨时,在垂直于梯跑方向地震作用下,框架结构边柱内力较大;框架梁对整体框架结构的耗能贡献较多,增强了框架结构的抗震性能,大震时楼梯构件严重破坏较晚,设置隔震防倒塌支座可保证楼梯整体稳定性。

**关键词:** 隔震防倒塌支座; 钢筋混凝土框架结构; 结构平面形心; 楼梯; 扭转

**中图分类号:** TU375.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2017)06-0996-09

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.0996

## Influence of Isolation and Collapse Prevention Bearings and Location of Stairwells on the Seismic Performance of Frame Structures

CHANG Yafeng<sup>1,2</sup>, LIANG Xingwen<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>, XIN Li<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;  
2. Shaanxi Province Academy of Building Research, Xi'an 710082, Shaanxi, China;  
3. China Northwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, Shaanxi, China)

**Abstract:** To study the influence of isolation and collapse prevention bearings at the end of a stair plate and location of the stairs on the seismic performance of reinforced concrete frame structures, three groups and six models including isolation collapse prevention supports were built using the ETABS software. The effect of frame structures with isolation and collapse prevention bearings and stairwell location on the vibration, internal force, and failure mechanism were analyzed by modal analysis, response spectrum analysis, and pushover analysis. The calculation re-

① 收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 中国建筑股份有限公司科技研发课题(CSCEC-2015-Z-41); 国家自然科学基金项目(51278402, 51078305)

作者简介: 常亚峰(1990—), 男, 河南商丘人, 硕士生, 从事建筑结构抗震性能研究。E-mail: 15529052520@163.com。

通信作者: 梁兴文(1952—), 男, 陕西华县人, 教授, 硕士, 从事建筑结构及抗震研究。E-mail: liangxingwen2000@163.com。

sults show that the location of the stairwell has little impact on torsion of the frame structures after adding isolation and collapse prevention bearings, and the vibration in the two major axes directions of the frame structure is similar, that is, the internal force of the stair columns is significantly reduced. When the layout of the stairwells is in the side span, the internal force of the stair columns is stronger when the frame is subjected to an earthquake in the direction perpendicular to the ladder. The frame beams have improved the structural seismic performance by dissipating the earthquake energy. The overall stability of the stairs can be guaranteed with the isolation and collapse prevention bearings, and the failure of the stairs is delayed during a major earthquake.

**Key words:** isolation and collapse prevention bearing; RC frame structure; structural center; stairwell; torsion

0 引言

历次大地震现象表明,楼梯间是钢筋混凝土框架结构的一个震害集中区<sup>[1-2]</sup>,现浇楼梯构件往往先于框架主体结构而发生严重破坏。楼梯间的震害问题,已引起广泛关注<sup>[1-8]</sup>,由于楼梯间本身具有一定的刚度,它的不同布置方案会对整体框架结构地震反应产生较大影响,若其布置不当会造成结构平面不规则,因此合理的楼梯间布置方案能增强楼梯乃至整体框架结构的抗震性能。我国建筑规范<sup>[9-10]</sup>规定,楼梯间的布置不应导致结构平面特别不规则,应尽量减小其造成的结构平面不规则。

已有研究表明<sup>[6]</sup>,现浇楼梯间的位置对整体框架结构刚度及内力分布影响较大,为了减小普通钢筋混凝土框架结构的扭转效应,其楼梯间应尽量关于框架结构平面形心对称布置在框架结构外围,但同时又引起楼梯间框架柱内力显著增大的问题。因此为了减小楼梯间框架柱的内力,可在梯段板下端设置隔震防倒塌支座<sup>[3-11]</sup>。

为分析梯段板下端设置隔震防倒塌支座及楼梯

间位置对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响,本文设计 3 种楼梯间布置方案,又在此基础上在梯段板下端设置隔震防倒塌支座,共计 6 个计算模型。对其进行模态分析、反应谱分析及 Pushover 分析,研究设置隔震防倒塌支座对框架结构抗震性能的影响,以期得出钢筋混凝土框架结构中梯段板下端设置隔震防倒塌支座楼梯间的合理布置方案。

1 计算模型

1.1 模型类别

利用 ETABS 有限元分析软件,建立楼梯间不同布置的框架结构计算模型。参考有关学者研究结果<sup>[6]</sup>,本文考虑 3 种楼梯间布置方案,均使两楼梯间关于结构平面形心对称布置,并且考虑了楼梯间与结构平面形心距离的影响;又在此 3 种方案的梯段板下端设置隔震防倒塌支座,共计 6 个计算模型,均采用图 1 所示的结构布置。

在模型 1[图 2(a)]、模型 2[图 2(b)]、模型 3[图 2(c)]中,两楼梯间关于坐标原点(建筑中心)对称布

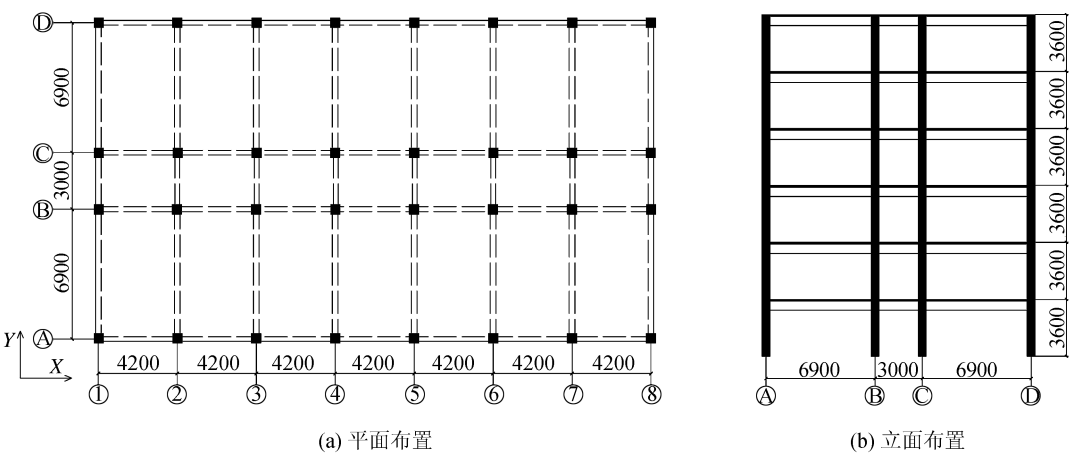


图 1 框架结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of frame structure

置,楼梯间构造如图 3(a)。模型 4、模型 5、模型 6 除在楼梯间梯段板下端设置隔震防倒塌支座[图 3(b)]外,其余结构均分别采用模型 1、模型 2、模型 3 的计算模型。

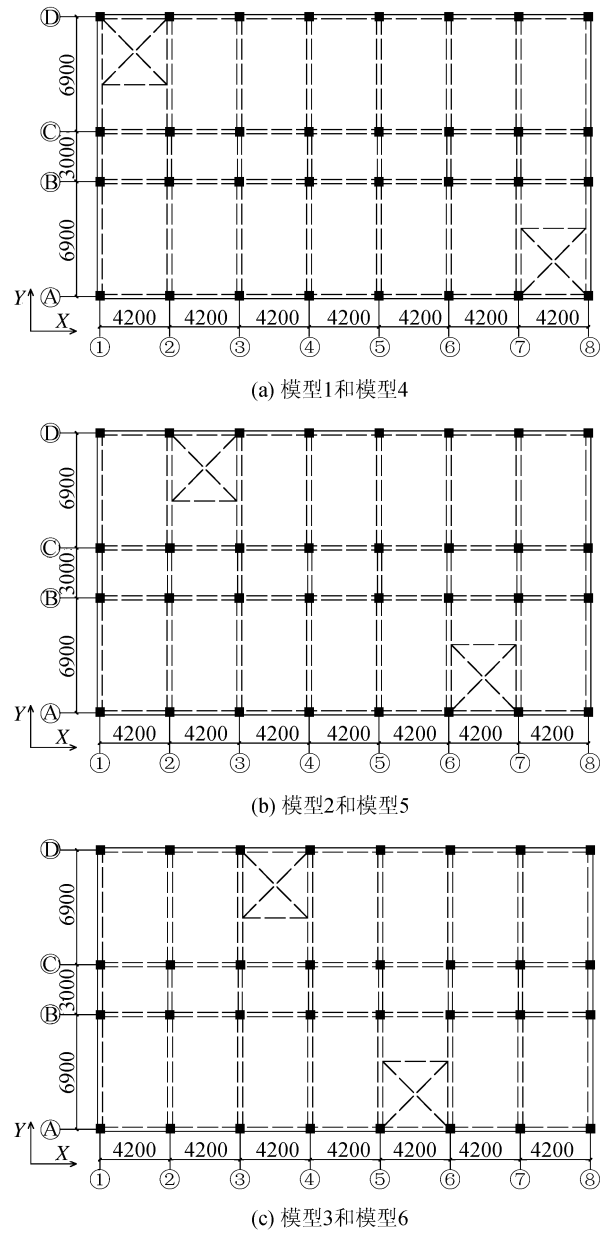


图 2 楼梯间布置方案  
Fig.2 Locations of stairwells

1.2 模型设计参数

抗震设防烈度为Ⅷ度(0.2g),Ⅱ类场地,设计地震分组为第二组,场地特征周期为 0.4 s。构件截面尺寸:框架柱为 500 mm×500 mm,横向(Y 向)框架梁为 300 mm×700 mm,纵向(X 向)框架梁为 250 mm×550 mm,走道梁为 250 mm×400 mm;梯梁为 250 mm×450 mm,梯柱为 300 mm×300 mm。楼面板与屋面板厚度均为 110 mm;梯段

板宽为 1.8 m,厚为 110 mm;休息平台板宽为 1.8 m,厚为 110 mm;梯井宽度为 0.6 m。梁、柱、板内钢筋保护层厚度分别取 25 mm、30 mm、15 mm。除楼梯间出口处外,各框架梁上均设有填充墙,填充材料采用 250 mm 厚加气混凝土砌块,M5 混合砂浆砌筑。框架结构中梁、柱、板、梯板、梯梁、梯柱混凝土均采用 C30;梁、柱、梯梁、梯柱受力钢筋均采用 HRB400;梁、柱、梯梁、梯柱箍筋,楼板、梯板、平台板钢筋以及构造筋均采用 HPB300。

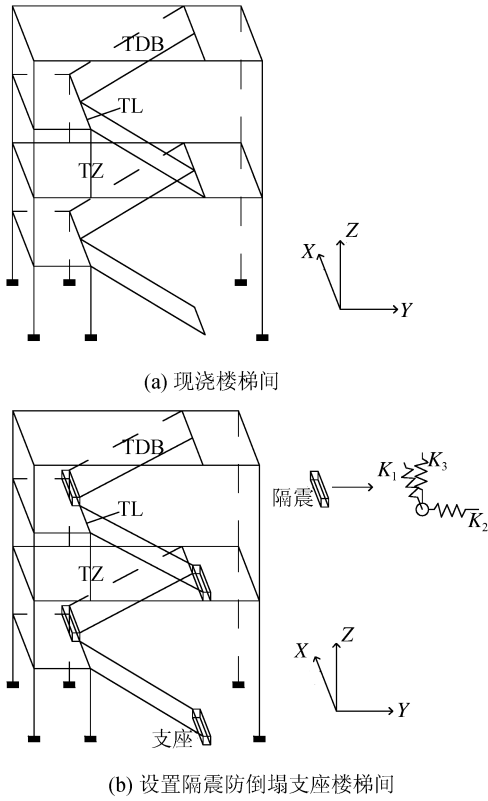


图 3 梯段板下端构造

Fig.3 Details at bottom of the stair plate

本文利用 ETABS 有限元分析软件进行建模与分析。框架结构中所有梁、柱(包括梯梁、梯柱)使用框架杆单元模拟,楼板、平台板使用膜单元模拟,梯段板采用薄壳单元模拟。隔震防倒塌支座(未加铅芯)用 Rubber Isolator 连接单元模拟,厂方提供的产品参数: $K_1=K_2=1\ 072\text{ kN/m}$ , $K_3=10\ 307\text{ kN/m}$ [图 3(b)]。

根据荷载规范<sup>[12]</sup>,该框架结构荷载标准值:楼面恒荷载为 5 kN/m<sup>2</sup>,房间和走道的楼面活荷载分别为 2 kN/m<sup>2</sup> 和 3.5 kN/m<sup>2</sup>,屋面恒荷载为 5 kN/m<sup>2</sup>,屋面活荷载为 2 kN/m<sup>2</sup>;此外,布置填充墙的框架梁上线荷载为 7 kN/m。按荷载规范计算得到楼梯间荷载标准值:恒荷载为 8 kN/m<sup>2</sup>,活

荷载为 3.5 kN/m<sup>2</sup>。计算重力荷载代表值时,活荷载组合值系数取 0.5。

## 2 框架结构模态分析

对 6 个模型进行模态分析,得到各模型前 3 阶

振型(第一振型)的质量参与比如表 1 所列。表 1 中  $U_x$  和  $U_y$  分别表示振型在  $X$  和  $Y$  方向平动的质量参与比, $R_z$  表示该振型绕  $Z$  轴转动的质量参与比,Sum $U_x$ 、Sum $U_y$  和 Sum $R_z$  则分别表示各质量参与比振型顺序累加值。

表 1 模型质量参与比  
Table 1 Model participating mass ratio

| 模型编号 | 振型  | $U_x$   | $U_y$   | $R_z$   | Sum $U_x$ | Sum $U_y$ | Sum $R_z$ |
|------|-----|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 模型 1 | 1 阶 | 0.826 9 | 0.000 6 | 0.000 0 | 0.826 9   | 0.000 6   | 0.000 0   |
|      | 2 阶 | 0.000 7 | 0.836 8 | 0.000 8 | 0.827 5   | 0.837 4   | 0.000 8   |
|      | 3 阶 | 0.000 0 | 0.000 8 | 0.836 0 | 0.827 5   | 0.838 2   | 0.836 9   |
| 模型 2 | 1 阶 | 0.832 6 | 0.000 4 | 0.000 0 | 0.832 6   | 0.000 4   | 0.000 0   |
|      | 2 阶 | 0.000 4 | 0.840 3 | 0.000 0 | 0.833 0   | 0.840 7   | 0.000 0   |
|      | 3 阶 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.840 5 | 0.833 0   | 0.840 7   | 0.840 5   |
| 模型 3 | 1 阶 | 0.832 0 | 0.000 4 | 0.000 0 | 0.832 0   | 0.000 4   | 0.000 0   |
|      | 2 阶 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.840 6 | 0.832 0   | 0.000 4   | 0.840 3   |
|      | 3 阶 | 0.000 5 | 0.839 6 | 0.000 0 | 0.832 4   | 0.840 0   | 0.840 6   |
| 模型 4 | 1 阶 | 0.000 0 | 0.836 8 | 0.000 0 | 0.000 0   | 0.836 8   | 0.000 0   |
|      | 2 阶 | 0.839 1 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.839 1   | 0.836 8   | 0.000 0   |
|      | 3 阶 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.837 1 | 0.839 1   | 0.836 8   | 0.837 1   |
| 模型 5 | 1 阶 | 0.000 0 | 0.839 4 | 0.000 0 | 0.000 0   | 0.839 4   | 0.000 0   |
|      | 2 阶 | 0.840 5 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.840 5   | 0.839 4   | 0.000 0   |
|      | 3 阶 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.840 8 | 0.840 5   | 0.839 4   | 0.840 8   |
| 模型 6 | 1 阶 | 0.000 0 | 0.839 2 | 0.000 0 | 0.000 0   | 0.839 2   | 0.000 0   |
|      | 2 阶 | 0.840 4 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.840 4   | 0.839 2   | 0.000 0   |
|      | 3 阶 | 0.000 0 | 0.000 0 | 0.841 5 | 0.840 4   | 0.839 2   | 0.841 5   |

由表 1 可知,模型 1 与模型 4、模型 2 与模型 5 相比,梯段板下端现浇框架结构前 3 阶振型顺序为  $X$  向平动、 $Y$  向平动、绕  $Z$  向扭转;梯段板下端设置隔震防倒塌支座框架结构前 3 阶振型顺序为  $Y$  向平动、 $X$  向平动、绕  $Z$  向扭转,且平动质量参与比均略微增大,说明梯段板下端设置隔震防倒塌支座使框架结构更加规则。模型 3 与模型 6 相比,模型 3 前 3 阶振型次序为  $X$  向平动、绕  $Z$  向扭转、 $Y$  向平动,模型 6 前 3 阶振型次序为  $Y$  向平动、 $X$  向平动、绕  $Z$  向扭转,表明梯段板下端设置隔震防倒塌支座后,框架结构前 2 阶振型均为平动振型,易满足结构在两个主轴方向的动力特性相接近。

表 2 为各模型前 3 阶振型(第一振型)的自振周期。模型 1、模型 2、模型 3 的  $X$  向和  $Y$  向平动周期基本接近,最大相差不超过 1%,表明梯段板下端现浇的楼梯间位置对框架结构两个主轴方向的动力特性影响较小;模型 1、模型 2、模型 3 的扭转为主的第一自振周期差别较大,最大相差达 21%,表明梯段板下端现浇的楼梯间位置对框架结构扭转效应有显著影响。模型 4、模型 5、模型 6 的  $X$  向和  $Y$  向平动周期以及扭转为主的第一自振周期差别均较小,最

大相差仅为 1%左右,表明梯段板下端设置隔震防倒塌支座后,楼梯间位置对框架结构两个主轴方向的动力特性、框架结构的扭转效应基本无影响。模型 1~模型 6 的两个主轴方向周期比( $T_x/T_y$ )分别为 1.21、1.12、1.11、0.96、0.97 和 0.97,表明梯段板下端设置隔震防倒塌支座使框架结构在两个主轴方向的动力特性比较接近。

表 2 模型结构自振周期  
Table 2 Model vibration period

| 周期                        | 模型 1  | 模型 2  | 模型 3  | 模型 4  | 模型 5  | 模型 6  |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $T_{x\text{平动}}/\text{s}$ | 0.673 | 0.668 | 0.662 | 0.759 | 0.756 | 0.752 |
| $T_{y\text{平动}}/\text{s}$ | 0.600 | 0.596 | 0.595 | 0.787 | 0.782 | 0.779 |
| $T_{z\text{扭转}}/\text{s}$ | 0.522 | 0.578 | 0.633 | 0.674 | 0.678 | 0.681 |

## 3 框架结构反应谱分析

在定义反应谱函数类型中选择添加 Chinese2010,荷载工况类型选择 Response Spectrum(反应谱),模态组合方法采用 CQC(完全平方根组合法),方向组合方法采用 SRSS(平方和平方根法),模态阻尼比采用常数 0.05。对框架结构  $X$  和  $Y$  两个方向进行反应谱分析。

在  $X$  方向地震作用下,各模型框架柱的最大轴

力出现在楼梯间框架柱或边柱,其他轴线框架柱的轴力均相对较小;图 4 为各模型 A 轴框架柱和梯柱轴力,图中数字代表轴力值。分别对比模型 1 与模型 4、模型 2 与模型 5、模型 3 与模型 6 可知,设置隔震防倒塌支座使楼梯间框架柱的轴力明显减小,最大减小幅度达 56%左右;表明梯段板下端设置隔震

防倒塌支座可有效改善楼梯间框架柱的受力状态。模型 4、模型 5 及模型 6 的楼梯间框架柱最大轴力分别为 519 kN、239 kN 及 236 kN,楼梯间位置对楼梯间框架柱轴力的影响较大,最大增加幅度为 1.19 倍;表明梯段板下端设置隔震防倒塌支座后,楼梯间不宜布置在最边跨。

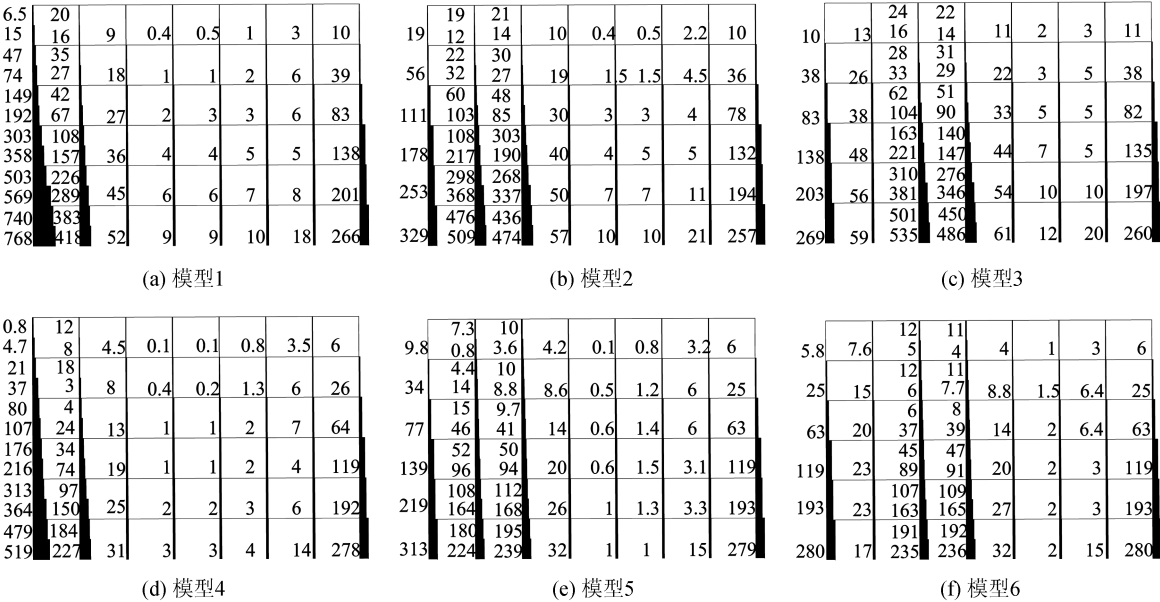


图 4 X 方向地震作用下 A 轴框架轴力图(单位:kN)

Fig.4 Frame axial force diagram along axis A under X direction earthquake action (Unit:kN)

在 Y 方向的地震作用下,模型 1 和模型 4 选取①轴框架、模型 2 和模型 5 选取②轴框架、模型 3 和模型 6 选取③轴框架进行比较分析。图 5 为各模型的剪力分布,图中数字代表剪力值。模型 4、模型 5、模型 6 的框架柱剪力(239 kN、247 kN、252 kN)均分别小于模型 1、模型 2、模型 3 的框架柱剪力(129 kN、127 kN、127 kN);梯段板下端设置隔震防倒塌支座后,楼梯间框架柱最大剪力减小幅度分别为 46%、48.5%、49.6%,特别是楼梯间框架柱在梯梁以上部分的剪力减小幅度最大,可改善现浇楼梯容易使框架柱(短柱)发生剪切破坏的受力状态。模型 4、模型 5、模型 6 的楼梯间框架柱最大剪力分布及大小基本相同,说明梯段板下端设置隔震防倒塌支座后,楼梯间位置对楼梯间框架柱沿梯跑方向地震作用的影响较小。

4 框架结构静力弹塑性分析

4.1 框架结构破坏机制

为了进一步研究梯段板下端设置隔震防倒塌支座及楼梯间位置对框架结构破坏机制的影响,将

ETABS 软件默认的塑性铰属性指定给各框架单元,在框架柱、梯柱两端指定 PMM 耦合铰,在框架梁、梯梁两端指定 M3 弯矩铰。施加侧向荷载之前,先定义(Gravity)重力荷载(dead+0.5live)非线性工况,初始条件选择从未加载应力状态开始,并采用荷载控制加载。然后定义(Pushover)静力弹塑性工况,初始条件选择从 Gravity 工况终点继续加载,施加荷载类型为 Acceleration,结构顶点位移角达到 0.02 时,定义为框架结构倒塌极限状态<sup>[13]</sup>,并采用位移控制加载<sup>[14-15]</sup>,对各模型 Y 向进行 Pushover 分析。通过结构构件出现塑性铰的数量、顺序及状态可以了解各框架结构的破坏机制。模型 1 和模型 4 取①轴框架、模型 2 和模型 5 取②轴框架、模型 3 和模型 5 取③轴框架进行分析。

为了更清楚地显示塑性铰的发展过程,分别用“○”表示梁、柱纵筋应力刚达到屈服强度,“●”表示梁、柱端形成塑性铰。图 6 为框架结构塑性铰发展顺序图,图中数字表示塑性铰出现的顺序。

模型 1、模型 2、模型 3 塑性铰的出现顺序为:底层梯梁端纵筋先屈服,然后框架梁端纵筋屈服,梯柱

端纵筋屈服,当底层全部框架柱端纵筋屈服时,表明整个结构进入了屈服阶段。随着侧移的增大,结构的塑性铰数量及塑性状态进一步发展,Pushover 分析因 X 向梯梁严重破坏而结束,此时框架梁端形成的塑性铰数量较少[图 6(a)~(c)],说明梯段板下端现浇的框架结构在楼梯构件严重破坏之前框架梁端塑性铰发展不充分,现浇楼梯构件破坏较早。

模型 4、模型 5、模型 6 塑性铰的出现顺序与模型 1、模型 2、模型 3 塑性铰的出现顺序基本类似。而 Pushover 分析因梯柱严重破坏而结束,此时框架梁端出现塑性铰数量较多[图 6(d)~(f)],说明梯段板下端设置隔震防倒塌支座使框架梁对整体框架结构的耗能贡献较多,有效地发挥了各框架结构构件的抗震性能,楼梯构件严重破坏较晚,设置梯段板下端隔震防倒塌支座可基本保证楼梯整体稳定性<sup>[2]</sup>。

### 4.2 基底剪力-顶点位移关系曲线

图 7 表示现浇楼梯框架结构、梯段板下端设置隔震防倒塌支座框架结构的基底剪力-顶点位移曲

线。由图 7(a)可见,现浇楼梯框架结构在顶点位移角达到 1/550 之前,基本处于弹性状态,表明其满足我国建筑抗震设计规范的要求。对现浇楼梯框架结构,其屈服基底剪力为 12 500 kN,最大基底剪力为 15 500 kN,基底剪力-顶点位移曲线呈上升趋势[图 7(a)],且模型 1、模型 2、模型 3 达到最大顶点位移时,框架梁端出现塑性铰数量较少[图 6(a)~(c)],说明楼梯构件先于主体结构发生严重破坏。

由图 7(b)可见,设置隔震防倒塌支座框架结构在顶点位移角达到 1/550 之前基本处于弹性状态,表明其也满足我国建筑抗震设计规范的要求。梯段板下端设置隔震防倒塌支座的框架结构,其屈服基底剪力为 85 000 kN,最大基底剪力为 96 000 kN,基底剪力-顶点位移曲线趋于水平[图 7(b)],且模型 4、模型 5、模型 6 达到最大顶点位移时,框架梁端出现塑性铰数量较多[图 6(d)~(f)],说明楼梯构件发生严重破坏相对较晚。

模型 1、模型 2、模型 3 的顶点屈服位移为 80 mm 左右,相应的顶点位移角为 1/270 左右;它们

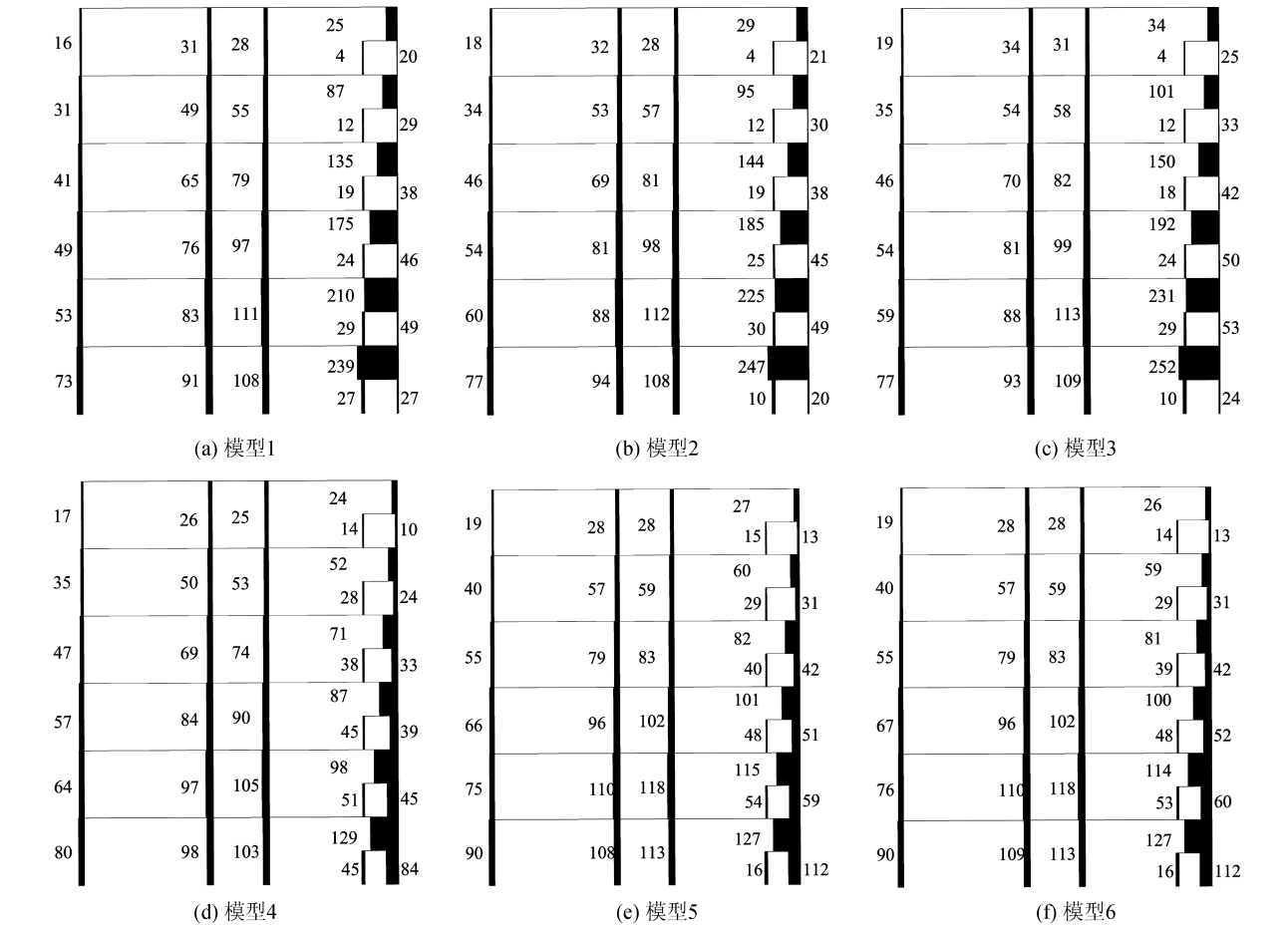


图 5 Y 方向地震作用下框架剪力图(单位:kN)

Fig.5 Frame shear diagram under Y direction earthquake action (Unit:kN)

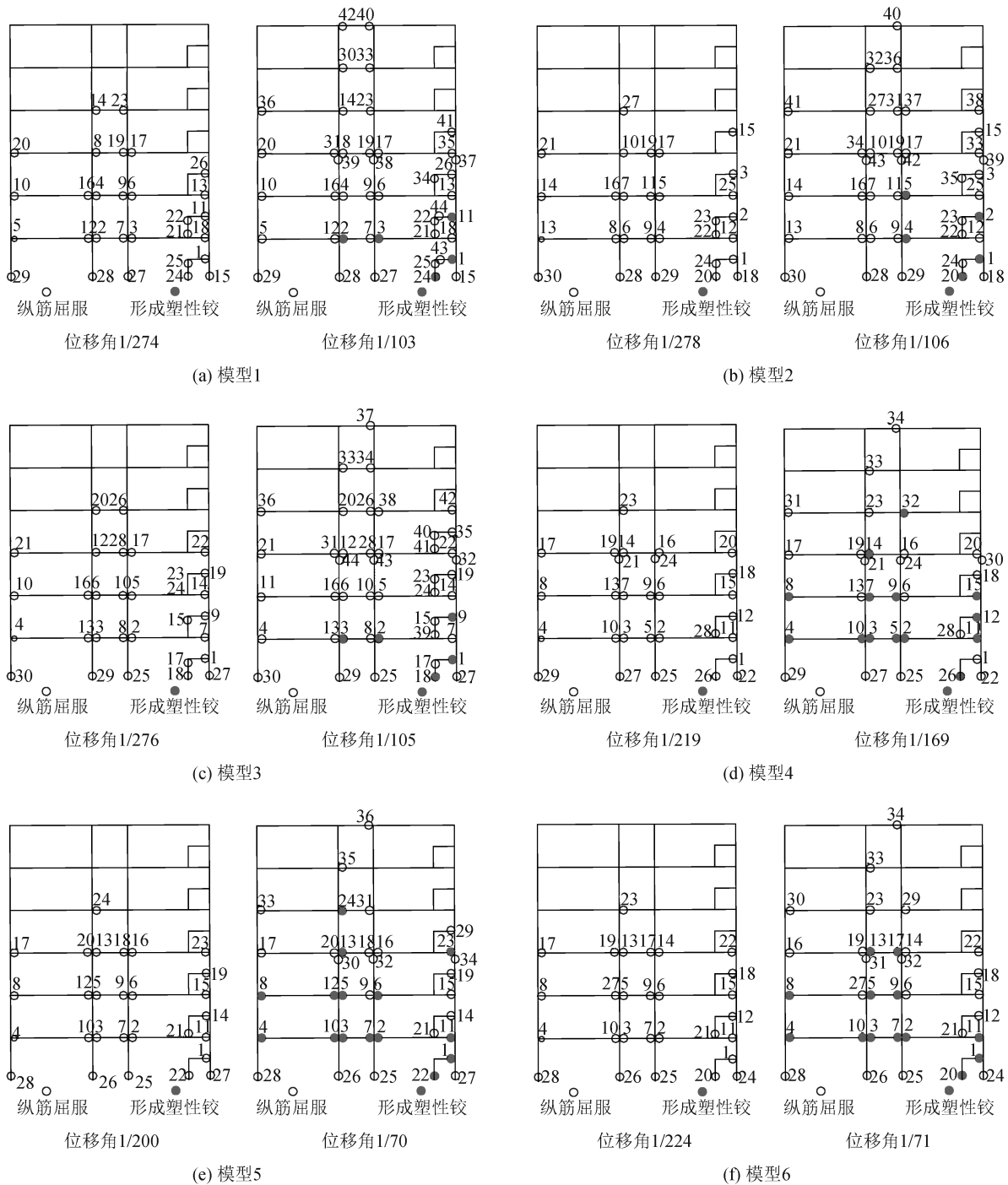


图 6 结构塑性铰发展顺序图

Fig.6 The structural failure modes

的最大顶点位移为 205 mm 左右,相应的顶点位移角为 1/105 左右[图 7(a)];模型 4、模型 5、模型 6 的顶点屈服位移为 97 mm 左右,相应的顶点屈服位移角为 1/222 左右,它们的最大顶点位移为 304 mm 左右,相应的最大顶点位移角为 1/70 左右[图 7(b)]。模型 1~模型 6 的顶点最大位移与屈服位移之比分别为 2.61、2.56、2.57、3.17、3.13、3.12,说明现浇楼梯框架结构的变形能力较弱,而梯段板下端

设置隔震防倒塌支座后,框架结构的变形能力明显增强,且楼梯间位置对框架结构的变形能力基本无影响。

5 结论

(1) 与现浇楼梯框架结构相比,设置隔震防倒塌支座后,楼梯间的位置对框架结构的扭转效应影响较小,减小了框架结构因楼梯间布置而造成的结

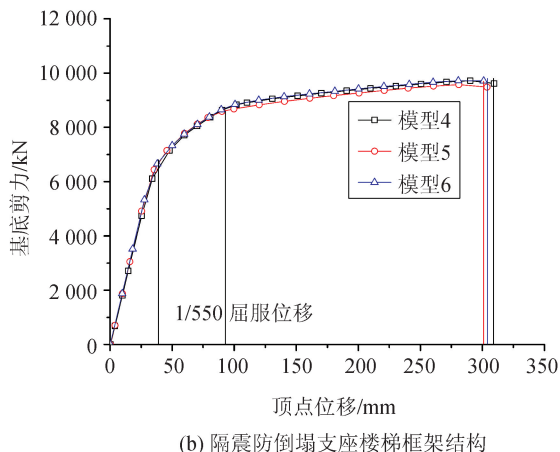
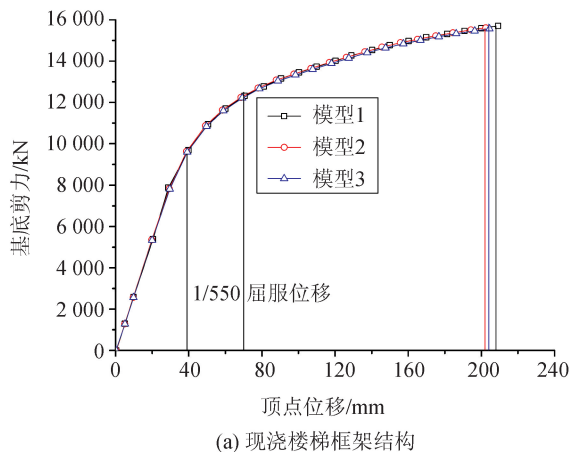


图7 结构基底剪力-顶点位移曲线

Fig.7 Base shear vs top displacement curve of structure

构平面不规则。且设置隔震防倒塌支座使框架结构在两个主轴方向的动力特性基本相近。

(2) 设置隔震防倒塌支座后,楼梯间框架柱内力均显著降低,楼梯间位置对楼梯间框架柱沿梯跑方向地震作用的影响较小;但楼梯间布置在最边跨时,在垂直于梯跑方向地震作用下,框架结构边柱的内力较大。

(3) 设置隔震防倒塌支座使框架梁对整体结构的耗能贡献较多,充分发挥了框架结构抗震性能。设置隔震防倒塌支座使楼梯间位置对框架结构变形能力和基底剪力基本无影响。大震时楼梯构件严重破坏较晚,设置隔震防倒塌支座可保证楼梯整体稳定性。

## 参考文献(References)

- [1] 冯远,吴小宾,李从春,等.现浇楼梯对框架结构的抗震影响分析与设计建议[J].土木工程学报,2010,43(10):53-62.  
FENG Yuan, WU Xiaobin, LI Congchun, et al. A Study of the Earthquake-resistance Performance of Frames with Staircases [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(10): 53-62.
- [2] 郑山锁,马德龙,刘洪珠,等.汶川地区震后钢筋混凝土框架结构的地震易损性研究[J].地震工程学报,2015,37(1):131-137.  
ZHENG Shansuo, MA Delong, LIU Hongzhu. Seismic Vulnerability of Post-earthquake Reinforced Concrete Frame Structures in the Wenchuan Area [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 131-137.
- [3] 刘源,辛力,曾凡生,等.楼梯间减震防倒塌支座设计与探讨[J].地震工程与工程振动,2014,34(6):66-73.  
LIU Yuan, XIN Li, ZENG Fansheng. Design and Study of Damping and Collapse Preventing Bearing for Stairwell [J].

Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34 (6): 66-73.

- [4] 王奇,马宝民.钢筋混凝土现浇楼梯对整体结构的影响[J].建筑结构,2002,32(4):27-29.  
WANG Qi, MA Baomin. Effect of Cast-in-place Stairs on Monolithic Structure [J]. Building Structure, 2002, 32(4): 27-29.
- [5] 吴小宾,冯远,熊耀清,等.带楼梯框架结构静力推覆分析及弹塑性性能研究[J].建筑结构,2011,41(3):31-35.  
WU Xiaobin, FENG Yuan, XIONG Yaoqing. Pushover Analysis and Research of Elastic-plastic Performance for Frame Structure with Staircase [J]. Building Structure, 2011, 41(3): 31-35.
- [6] 张耀庭,段剑林.钢筋混凝土框架结构中楼梯间布置位置的研究[J].建筑结构学报,2013,34(5):72-79.  
ZHANG Yaoting, DUAN Jianlin. Research on Location of Stairwells in RC Frames [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(5): 72-79.
- [7] 曹万林,庞国新,李云霄.带楼梯框架弹塑性工作性能研究[J].世界地震工程,1996(3):52-56.  
CAO Wanlin, PANG Guoxin, LI Yunxiao. On Elastoplastic Performance of Frame with Staircase [J]. World Earthquake Engineering, 1996(3): 52-56.
- [8] 曹万林,庞国新,李云霄.带楼梯框架弹性层刚度的试验研究[J].世界地震工程,1996(2):29-32.  
CAO Wanlin, PANG Guoxin, LI Yunxiao. The Test Research on Elastic Floor Rigidity of Frame with Staircase [J]. World Earthquake Engineering, 1996(2): 29-32.
- [9] 建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building: JGJ 3-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.

[11] 陈波.大型渡槽盆式橡胶隔震支座轴向刚度研究[J].水利水电技术,2016,47(5):21-23,28.

CHEN Bo.Study on Axial Stiffness of Pot Rubber Isolation Bearing for Large-sized Aqueduct[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2016,47(5):21-23,28.

[12] 建筑结构荷载规范:GB 50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

Load Code for the Design of Building Structures:GB 50009-2012[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2006.

[13] 吕大刚,崔双双,陈志恒.基于 Pushover 分析的钢筋混凝土框架结构抗侧向倒塌能力评定[J].工程力学,2013,30(1):180-189.

LÜ Dagang,CUI Shuangshuang,CHEN Zhiheng.Assessment of Sides way Collapse Resistant Capacity of Reinforced Concrete Frame Structures Based on Pushover Analysis[J].Engineering Mechanics,2013,30(1):180-189.

[14] 管民生,杜宏彪.现浇楼板参与工作后框架结构的 Pushover 分析研究[J].地震工程与工程振动,2005,25(5):117-123.

GUAN Minsheng,DU Hongbiao.Pushover Analysis of Effect of Casting Slab on RC Frame Structure[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2005,25(5):117-123.

[15] 刘俊,沈火明.现浇板式楼梯斜撑作用释放的 Pushover 分析[J].四川建筑科学研究,2013,39(6):176-179.

LIU Jun,SHEN Huoming.Pushover Analysis of Plate Stair Diagonal Brace Role Release[J].Sichuan Building Science,2013,39(6):176-179.